

건설현장 산성배수의 발생현황 및 피해저감대책

김재곤*

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

Acid Drainage and Damage Reduction Strategy in Construction Site: An Introduction

Jae Gon Kim*

Geological and Environmental Hazard Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Daejeon 305-350, Korea

Acid drainage has been recognized as an environmental concern in abandoned mine sites for long time. Recently, the environmental and structural damage by acid drainage is a current issue in construction sites in Korea. Here, the author introduces the type of damages by acid drainage in construction sites and emphasizes the importance of geoscience discipline in solving the problem. Metasedimentary rock of Okcheon group, coal bed of Pyeongan group, Mesozoic volcanic rock, and Tertiary sedimentary and volcanic rocks are the major rock types with a high potential for acid drainage upon excavation in Korea. The acid drainage causes the acidification and heavy metal contamination of soil, surface water and groundwater, the reduction of slope stability, the corrosion of slope structure, the damage on plant growth, the damage on landscape and the deterioration of concrete and asphalt pavement. The countermeasure for acid drainage is the treatment of acid drainage and the prevention of acid drainage. The treatment of acid drainage can be classified into active and passive treatments depending on the degree of natural process in the treatment. Removal of oxidants, reduction of oxidant generation and encapsulation of sulfide are employed for the prevention of acid drainage generation.

Key words : Construction site, Distribution of rocks, Damage types, Countermeasure

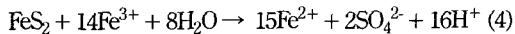
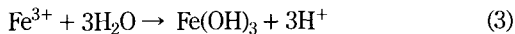
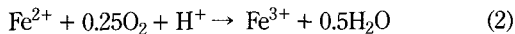
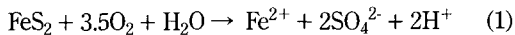
산성광산배수는 휴폐광산 광해의 주요한 문제로 널리 인식되어 왔으며 최근 황화광물을 많이 함유한 지역의 지반 굴착 건설현장에서 산성배수의 발생과 이로 인한 환경오염과 구조물의 안정성 저해가 건설 분야의 현안문제로 대두되고 있다. 지구과학분야에서 간과하고 있는 건설현장에서 발생된 산성배수에 의한 피해 사례를 소개하고 향후 피해저감대책기술 개발과정에서 지구과학분야 역할의 중요성을 피력하고자 한다. 우리나라에서 산성배수를 발생시킬 개연성이 높은 대표적인 암석은 옥천층군 변성퇴적암, 평안층군 함탄층, 중생대 화산암, 제3기 퇴적암 및 화산암이며 우리나라 표면적의 약 20%정도를 차지할 것으로 추정된다. 최근 건설현장에서는 산성배수에 대한 적절한 대책이 수립되지 않고 대규모 절토와 터널굴착이 빈번히 이루어지고 있으며 향후 산성배수에 의한 피해는 지속적으로 발생할 것으로 판단된다. 건설현장의 산성배수는 토양, 지표수와 지하수의 산성화 및 중금속 오염, 식생고사, 경관훼손, 사면안정성 저해, 구조물 부식, 콘크리트 및 아스콘 노후화 촉진 등이다. 암석의 산성배수 발생개연성평가는 static test와 kinetic test 방법이 있으며, 암석의 산성배수 발생능력과 중화능력을 측정하여 암석의 산성배수 발생개연성을 간접적으로 추정하는 acid base accounting test가 가장 널리 활용되고 있다. 산성배수에 대한 피해저감대책은 산성배수의 처리와 발생억제로 구분된다. 산성배수 처리방법은 중화제 투입 등의 적극적 처리와 자연적인 물리·화학·생물학적 과정을 이용한 소극적 처리로 구분된다. 산성배수의 발생억제는 산화제의 제거와 생성억제, 산화제와 황화광물의 접촉차단으로 구분된다.

주요어 : 건설현장, 암석분포, 피해유형, 피해저감대책

*Corresponding author: jgkim@kigam.re.kr

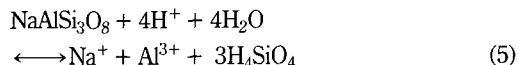
1. 산성배수 발생 및 암석의 분포

황화광물(sulfides)은 암석과 퇴적물에 흔히 산출되는 광물로서 퇴적물의 속성작용, 열수로부터 침전, 열수와 암석의 반응 등 다양한 지질작용에 의하여 생성된다. 생성조건에 따라 argentite(Ag₂S), chalcocite(CuS), galena(PbS), sphalerite[(Zn, Fe)S], chalcopyrite (CuFeS₂), covellite(CuS), cinnabar(HgS), pyrite(FeS₂), arsenopyrite(FeAsS) 등 다양한 황화광물이 있으며 황철석(pyrite)은 가장 흔한 광물로서 산성배수(acid drainage) 발생의 주원인 광물이다. 황화광물은 지하에서 대기와 차단된 상태로 존재하면 안정하나 지반굴착, 배수, 지하수위 강하, 준설 등에 의하여 지표환경에 노출되면 황화광물은 용존산소와 반응하여 황산을 생성하고 산성배수를 발생시킨다. 가장 흔한 황화광물인 황철석의 산화과정은 다음과 같다(Stum and Morgan, 1995).



황철석의 산화반응은 미생물의 작용과 순수 무기적인 반응의 복합과정이다. 황철석의 산화에 관여하는 미생물들은 *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus novellus*, *Thiobacillus acidophilus*, *Sulfurlobus acidocaldarius*, *Leptospirillum ferrooxidans* 등이 있다. 황철석의 산화반응 초기에는 반응 (1), (2), (3)이 우세하며 일정농도 이상의 수소이온(H⁺)이 생성되면 Fe(OH)₃ 생성반응[반응 (3)]이 발생하지 않고 Fe³⁺는 황철석의 산화제로 작용하여 많은 양의 황산을 생성한다[반응 (4)]. Fe²⁺의 Fe³⁺로 산화반응에는 용존산소뿐만 아니라 미생물의 작용이 중요한 것으로 알려져 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).

황화광물의 산화에 의하여 생성된 산성배수는 수소이온을 소모하면서 조암광물의 용해도를 증가시킨다.



따라서 산성배수는 황화광물로부터 용출된 Fe, 중금속, SO₄²⁻뿐만 아니라 조암광물의 용해과정에 용출된 다양한 종류의 이온을 함유한다. 일반적으로 산성배수는 높

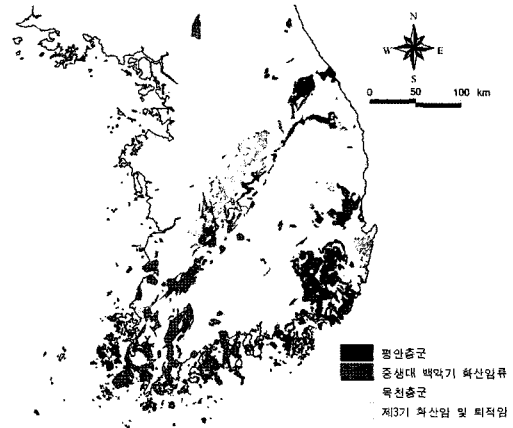


Fig. 1. Distribution of rocks with high potential of acid drainage.

은 농도의 Fe, Al, 중금속, SO₄²⁻를 함유하는 특성을 가진다.

토양학에서 산성배수를 발생시키는 토양을 특이산성토(acid sulfate soil)로 정의하고 있으며 특이산성토는 현재성 특이산성토(actual acid sulfate soil)와 잠재성 특이산성토(potential acid sulfate soil)로 분류한다(Nordstrom, 1982). 우리나라에서 산성배수를 발생시킬 개연성이 높은 잠재성 특이산성토는 평안충군 탄층, 육천충군 변성퇴적암, 중생대 화산암류, 제3기 퇴적암 및 화산암류, 광화대지역 암석이다(Fig. 1). 김해통, 봉림통, 해척통, 등구통이 우리나라에 분포하고 있는 대표적인 현재성 특이산성토로서 하구퇴적물 기원토양이다(NIAST, 2000).

2. 산성배수에 의한 피해

최근 새로운 도로건설, 기존도로확장, 대규모 택지 및 산업단지 조성 등으로 대규모 지반굴착이 빈번히 이루어지고 있다. 산성배수에 의한 피해는 휴폐광산지역의 대표적인 환경오염으로만 인식되어 왔으나 건설현장에서 산성배수에 의한 피해가 사회현안으로 대두되고 있다. 건설현장에서 발생하는 산성배수는 pH 4 이하의 강산성이며 다량의 중금속, 철, 알루미늄, 망간 등을 함유하고 있어 주변지역의 환경오염뿐만 아니라 구조물부식, 식생고사, 경관훼손, 암석풍화촉진, 사면안정성 저해 등 다양한 문제를 야기하고 있다. CS고속도로건설현장, UB고속도로건설현장, BB국도확장공사현장, EY도수로공사현장, G방수로공사현장, YS택지조성지구에서 산성배수에 의한 민원과 공사중단이 발생하

였다. 건설현장에서 야기된 산성배수에 의한 문제는 환경오염복원, 공사중단, 구조물 보호를 위한 대책수립 및 시행으로 막대한 추가 비용이 발생되고 있다.

대규모 건설사업은 건설공사의 시행 초기 단계에서 사전환경영향평가를 실시하도록 명문화되어 있다. 환경영향평가서 작성지침(환경부고시 제2001-7호, 2001)에 의하면 지형·지질의 항목작성에서 건설공사에 수반된 산성배수가 발생되어 주변 환경에 심각한 영향을 줄 것으로 예측될 경우 피해저감대책을 수립하도록 지침하고 있다. 건설현장에서 산성배수에 대책은 휴폐광산 지역을 중심으로 검토되고 있으며 환경영향평가, 조사 및 설계 단계에서 산성배수에 대책수립은 형식적으로 이루어져왔다. 건설현장에서 산성배수의 발생은 공사시작 수개월 후에 발생됨으로 조사·설계단계에서 적절한 평가와 대책수립이 이루어지지 않은 현장에서는 산성배수에 의한 막대한 피해가 발생되고 있다.

2.1. 환경오염

산성배수는 높은 농도의 H⁺, 중금속(Cd, Cu, As, Zn, Pb 등), Al, Fe, Mn 등을 함유하고 있다. 건설현장에서 발생된 산성배수는 건설현장뿐만 아니라 주변 지역의 토양, 지표수, 지하수를 산성화시키고 중금속, Fe, Al, Mn으로 오염시킨다. 토양, 지표수, 지하수의 중금속오염은 질병의 유발, 생태계 교란 등 다양한 환경문제를 유발하는 것으로 알려져 있다(Kalin *et al.*, 2006; Koryak *et al.*, 1972). 최근 절취사면에서 발생된 산성배수의 수질을 조사한 결과 H⁺, Al, Fe, Mn 이 주요 오염물질이며 일부사면에서 중금속이 환경기준을 상회하는 것으로 보고되고 있다(Lee *et al.*, 2005). 산성배수가 주변지역으로 유입되어 중화되면 다

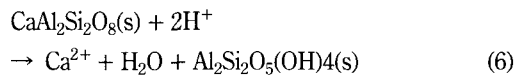


Fig. 2. Surface water contamination by the acid drainage from a construction site.

량의 중금속을 함유한 산화철, 알루미늄화합물 등을 침전시킨다(Fig. 2). 특히 하상에 생성된 침전물은 저서생물의 서식공간을 파괴하고 생성된 미세한 입자는 어류의 아가미에 부착되어 질식사킨다.

2.2. 암석풍화 촉진 및 사면안정성 저해

암석이 강산성의 산성배수에 노출되면 조암광물의 용해도가 증가하여 암석의 풍화가 촉진된다. 암석의 풍화는 산을 소모하는 과정으로 산성배수에 노출된 암석은 산성배수를 중화시키면서 용해가 가속화된다.



신선한 암석이 지표에 노출되어 약 10년이 경과한 후 풍화도로 풍화가 진행된 사례도 조사되었다(Fig. 3). 강우 혹은 사면배수에 의하여 생성된 산성배수는 건기에 용존 이온의 농도가 증가하면서 암석의 틈과 표면

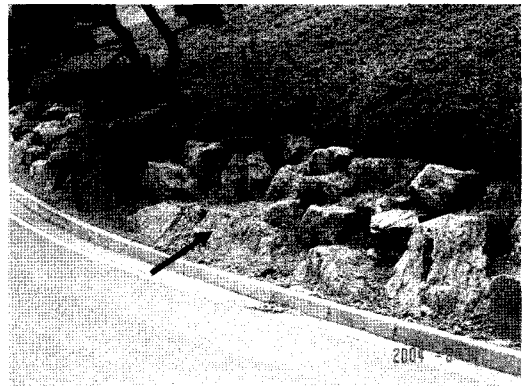


Fig. 3. Accelerated rock weathering after 10 years of landscaping.



Fig. 4. Water soluble sulfate on an acid drainage generating cut slope.

에 수용성 황산염광물을 생성시킨다. 특히 암석의 틈에 생성된 황산염광물은 쇄기로 작용하여 암석의 물리적 풍화를 촉진시킨다(Fig. 4). 특히 절리가 많이 발달된 사면에서 산성배수가 생성될 경우 절리면을 따라 침투한 산성배수는 암석의 화학적 및 물리적 풍화를 촉진하여 암괴를 이완시키고 붕괴를 촉진한다. 산성배수에 의하여 촉진된 암석의 풍화는 사면안정성에 악영향을 미친다.

2.3. 구조물 부식

불안정한 사면을 대상으로 안정성 증대 및 안전사고 예방을 위하여 배수로, 옹벽, anchor, rock bolt, 그물망 등을 설치·시공한다. 사면안정성 증대와 안전사고 예방을 위한 구조물은 대부분 콘크리트 혹은 철재를 활용한다. 이러한 구조물은 사면에서 발생된 산성배수에 쉽게 부식되고 노후화를 촉진된다(Fig. 5). 또한 특이산성토 혹은 산성배수를 발생시키는 암석 혹은 토사

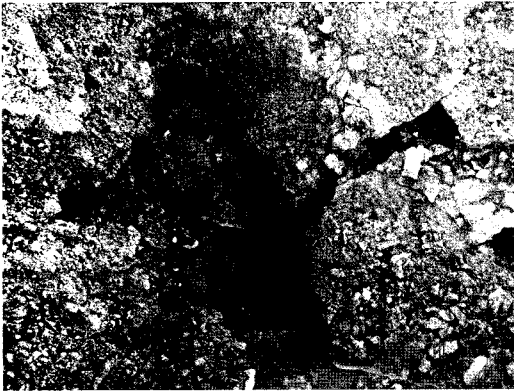


Fig. 5. Corrosion of shotcrete by acid drainage.



Fig. 6. Buried gas pipe line in an acid drainage generating earth.

로 성토된 지역에서 상하수도관, 가스배관 등을 지하에 매설하는 경우 배관의 부식을 촉진하고 이송물질의 누출에 의한 안전사고가 우려된다(Fig. 6).

2.4. 식생 고사

산성배수가 발생되고 있는 특이산성토와 산성배수의 영향을 받은 토양은 산성화되고, 식물가용성 중금속, Fe와 Al의 농도가 증가하게 된다(Golez and Kyuma, 1997; Hillwood *et al.*, 2006; Muhrizal *et al.*, 2006). 증가된 수소이온, 중금속, Fe, Al 농도는 식물에 독성을 나타내게 된다. 증가된 Al농도는 토양에 흡착된 Na, K, Ca, Mg를 교환하고 용탈을 촉진시킨다. 다른 양이온에 비해 토양입자에 강하게 흡착되는 Al은 다른 양이온의 흡착을 방해하여 유효양이온교환능력(effective cation exchange capacity)을 저하시킨다. 산성배수와 함께 토양에 유입된 Fe는 토양표면과 식물뿌리에 침전되어 영양분의 흡수와 호흡을 방해하고 투수율을 저감시킨다. 산성배수의 영향을 받은 토양은 산성화, 중금속과 Al의 독성, 토양의 물리화학적 특성의 변화에 의하여 식생의 성장이 부진하고 고사하는 사례가 많다(Fig. 7).

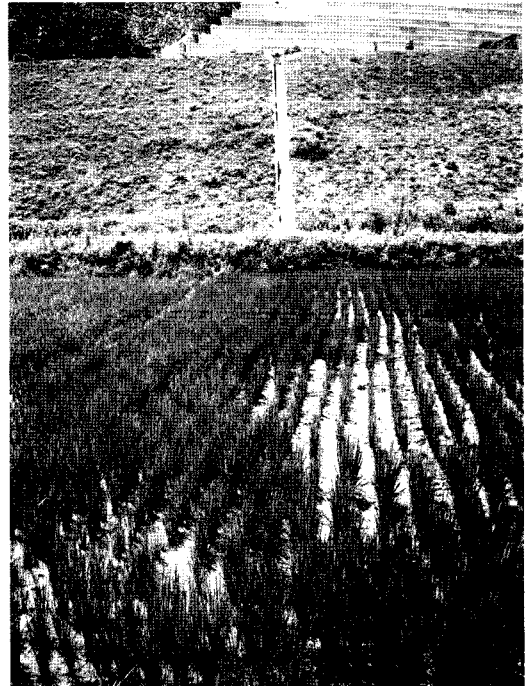


Fig. 7. Damaged rice field by acid drainage from a construction site.

2.5. 경관훼손

고농도의 Al과 Fe을 함유한 산성배수는 주변 매질과 반응하여 중화되면서 흰색의 수산화알루미늄과 붉은색의 수산화철, 산화철 등을 침전시킨다. 흰색 혹은 붉은색 침전물은 경관을 훼손한다(Fig. 8).

2.6. 콘크리트 및 아스콘 노후화 촉진

우리나라 골재품질평가는 강도, 마모성 등 물성측정을 통하여 이루어지고 있으며 황화광물의 함유량과 산성배수 발생개연성에 대한 평가는 이루어지지 않고 있다. 황화광물의 악영향에 대한 적절한 평가가 없이 사용되는 골재에 의한 피해가 많이 보고되고 있다(Floyd et al., 2003; Lee et al., 2005; Tagnit-Hamou et al., 2005). 콘크리트에 함유된 황철석은 용존산소를 함유한 물과 반응하여 산화되면서 산성배수를 발생시키고 산화철, 수산화철, ettringite 등의 2차 광물을 생성한다. 콘크리트 내에서 황철석의 산화는 산성배수에 의



Fig. 8. Damaged landscape by red colored precipitate from acid drainage.

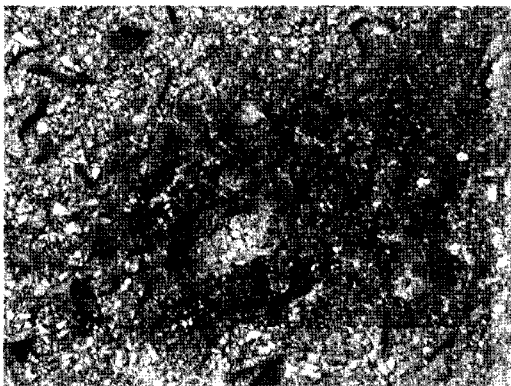


Fig. 9. Deterioration of asphalt pavement by the oxidation of pyrite in aggregates.

한 부식과 2차 광물생성에 의한 부피증가 및 강도저하로 콘크리트의 노후화가 촉진된다. 아스콘에 함유된 황철석은 산화에 의하여 산성배수를 생성시키고 골재의 풍화를 촉진시킨다. 산성배수는 아스콘의 분해와 골재의 급속한 풍화로 아스콘으로부터 골재의 이완과 탈착을 촉진시켜 아스콘의 노후화를 촉진한다(Fig. 9).

3. 산성배수 발생개연성 평가

암석과 퇴적물의 산성배수 발생개연성평가는 문헌조사, 현장평가와 실제 정량적 평가로 구성된다. 문헌조사는 주로 지질도와 토양도를 이용하여 조사한다. 지질도를 활용하여 암석의 조직, 구성광물, 색, 열수변질 작용, 광화대, 퇴적환경 등을 중심으로 암석의 황철석 함유여부와 산성배수에 대한 중화능력(탄산염광물의 존재)을 간접적으로 판단한다. 토양도를 이용하여 건설예정구간 토양의 특이산성 여부와 토양의 pH를 조사하여 토양으로부터 산성배수가 발생될 개연성이 있는지 판단한다. 현장평가는 노두에서 황화광물의 산출여부의 육안확인, 현장간이측정, 산성배수 발생 징후 조사로 이루어져 있으며, 현장평가에서 산성배수를 발생시킬 개연성이 있는 암석과 퇴적물을 대상으로 산성배수 발생개연성을 정량적으로 평가한다.

3.1. 현장평가(field screening)

현장평가는 산성배수를 발생시킬 개연성이 있는 물질과 개연성이 없는 물질을 구별하는 현장 screening이다. 현장평가항목은 (1) 황화광물의 산출 여부, (2) 암석표면, 하천, 토양의 붉은색 혹은 흰색 착색 여부, (3) 수용성 황산염광물의 침전물 생성여부, (4) 사면배수의 pH측정, (5) 과산화수소(H₂O₂)와 반응 및 용액의 pH측정이다. 노두 및 시추코어에서 황화광물의 존재와 붉은색 혹은 흰색의 착색은 지반굴착에 따른 산성배수 발생개연성을 지시하는 인자가 된다(Fig. 2, 5, 8). 수용성 황산염광물은 우기에 생성된 산성배수가 건조되면서 용존 이온이 증가하여 K, Na, Ca, Mg 등의 황산염광물이 생성된다(Fig. 4). 이러한 황산염광물은 강우 시에 용해되고 건조에 생성되는 현상을 반복한다. 일부 암석 혹은 퇴적물에 함유된 황화광물은 입자가 작아 현장에서 쉽게 확인되지 않는 경우가 많다. 황화광물은 과산화수소와 반응하여 산화되면서 산성수를 발생시킨다. 과산화수소에 의한 황화광물의 산화반응은 발열반응으로서 황화광물의 함량이 높은 경우 산화반응에 수반되어 용액의 온도가 급격히 상승하여 반응이

Table 1. Static test for the acid drainage potential of rocks(Sobek *et al.*, 1990).

Method	Acid drainage production potential	Neutralization potential
Acid base accounting	Total S*31.25	· <60 mesh sample · Add HCl and boil for 1 min. · Titration to pH 7.0
BC research initiation	Total S*31.25	· <300 mesh sample · Titration to pH 3.4 with 0.1N H ₂ SO ₄
Alkaline producing potential	Total S as indicator	· <0.023 mm sample · Reaction of 20ml 0.1N HCl and 0.4g sample · Titration to pH 4.0
Net acid production	Addition of 300 ml H ₂ O ₂ and 5 g material	· Titration to pH 7.0

Table 2. Kinetic test for the acid drainage potential of rocks (Sobek *et al.*, 1990).

Method	Procedure
Humidity cells	· <2.38 mm sample · Expose sample to dry air for 3 days, expose to humidified air for 3 days, rinsed with 200 ml distilled water
Soxhlet extraction	· Water passed through sample is distilled and recycled through sample
Column test	· Leaching with solution and recirculating
BC research confirmation	· <400 mesh sample · 15-30 g sample added to bacterially active solution at pH 2.2 to 2.5 and T=35°C · If pH increases, sample is acid drainage producing; If pH decreases, 0.5 original sample mass is added in each of two increments
Batch reactor	· <200 mesh · 200 g sample and 500 ml water are agitated
Field test	· field scale particles · 800 to 1300 ton test pile and monitoring water quality

폭발적으로 진행된다. 과산화수소를 이용한 평가는 암석과 퇴적물을 미세한 분말로 만들어 30% 과산화수소를 반응시키고 반응이 폭발적으로 진행되면 산성배수를 발생시킬 개연성이 높은 물질로 분류한다. 반응이 느리게 진행되면 반응완료 후에 용액의 pH가 산성이면 산성배수를 발생시킬 개연성이 있는 물질로 분류한다. 암석과 퇴적물이 산화망간의 함량이 높은 경우 과산화수소와 폭발적으로 반응함으로 사전에 산화망간의 존재여부를 확인 후 시험을 진행하여야 한다. 노동에서 배수가 존재하면 리트머스시험지 혹은 pH meter를 이용하여 사면배수의 pH를 측정할 수 있다.

3.2. 정량적 평가

암석의 산성배수 발생개연성을 정량적으로 평가하는 방법은 static test와 kinetic test로 나눌 수 있다 (Table 1, 2). Static test는 암석에 함유된 유황함량을 근거로 암석의 산성배수 발생능력을 계산하고 암석에 산을 첨가하고 소모량을 측정하여 산성배수에 대한 중화능력을 산정하는 방법이다. 순산발생량은 암석과 과산화수소(H₂O₂)를 반응시키고 발생된 산의 양을 측정하여 산출한다(Jennings and Dollhopf, 1995; Jennings

et al., 2000; Siddharth *et al.*, 2002). 암석의 산성배수 발생능력, 중화능력, 순산발생량을 이용하여 암석의 산성배수 발생개연성과 위해도를 산출한다. Kinetic test는 현장시료 혹은 파쇄시료를 대상으로 물과 일정시간 반응시킨 후 산성배수 발생량을 측정하는 방법이다 (Kargbo and He, 2004). Static test는 kinetic test에 비해 상대적으로 짧은 시간에 쉽게 암석의 산성배수 발생개연성을 간접적으로 측정할 수 있다. Kinetic test는 시간의 경과에 따른 산성배수의 생성과 증감속의 용출을 보다 정확히 추정할 수 있는 장점이 있다.

4. 산성배수 피해저감 대책

4.1. 산성배수 처리

산성배수 처리기술은 생물학적 방법과 무생물학적 방법으로 분류하며 또한 처리과정에서 인위적인 작용이 많이 개입되는 적극적 처리(active treatment)와 자연정화작용을 활용한 소극적 처리(passive treatment)로 분류한다(Johnson and Hallberg, 2005). 적극적 처리는 산성배수의 중화 및 증감속 제거를 목적으로 중화제와 생물재제를 투입하여 처리하는 방법으로 처리효율이 보

장되나 고비용인 단점이 있다. 중화 및 중금속 제거를 위하여 사용되는 대표적인 재제는 limestone(CaCO_3), hydrated lime[$\text{Ca}(\text{OH})_2$], pebble quicklime(CaO), soda ash(Na_2CO_3), caustic soda(NaOH), ammonia (NH_3), sulfidogenic 미생물재 이다.

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^{2+} 와 Fe^{3+} 의 비율 등에 의하여 결정된다(Hedin *et al.*, 1994, Fig. 10).

4.2. 발생억제

산성배수 발생의 근원이 되는 황화광물의 산화반응을 억제하는 방법은 산화제인 O_2 와 Fe^{3+} 의 제거, 산화제인 Fe^{3+} 의 생성억제, 산화제와 황화광물의 접촉차단이 있다(Johnson and Hallberg, 2005). 산성배수를 발생시킬 개연성이 높은 암석 혹은 폐기물에 유기물을 첨가하여 미생물을 활성화시켜 용존산소를 제거(Shamshuddin *et al.*, 2004; von Willert and Stehouwer, 2003)하고, 산소에 의한 Fe^{2+} 의 Fe^{3+} 로의 산화를 억제한다. 중화제의 첨가는 발생된 산성배수를 중화시킬 뿐만 아니라 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 의 침전을 유도하여 Fe^{3+} 를 제거하여 산성배수의 발생을 억제한다(Brady *et al.*, 1990). 또한 황화광물의 표면에 형성된 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 는 산화제의 표면접촉을 억제한다(Evangelou *et al.*, 1998; Nicholson *et al.*, 1990; Nicholson *et al.*, 1988; von Willert and Stehouwer, 2003).

황화광물의 산화제인 Fe^{3+} 는 황철석의 산화과정에서

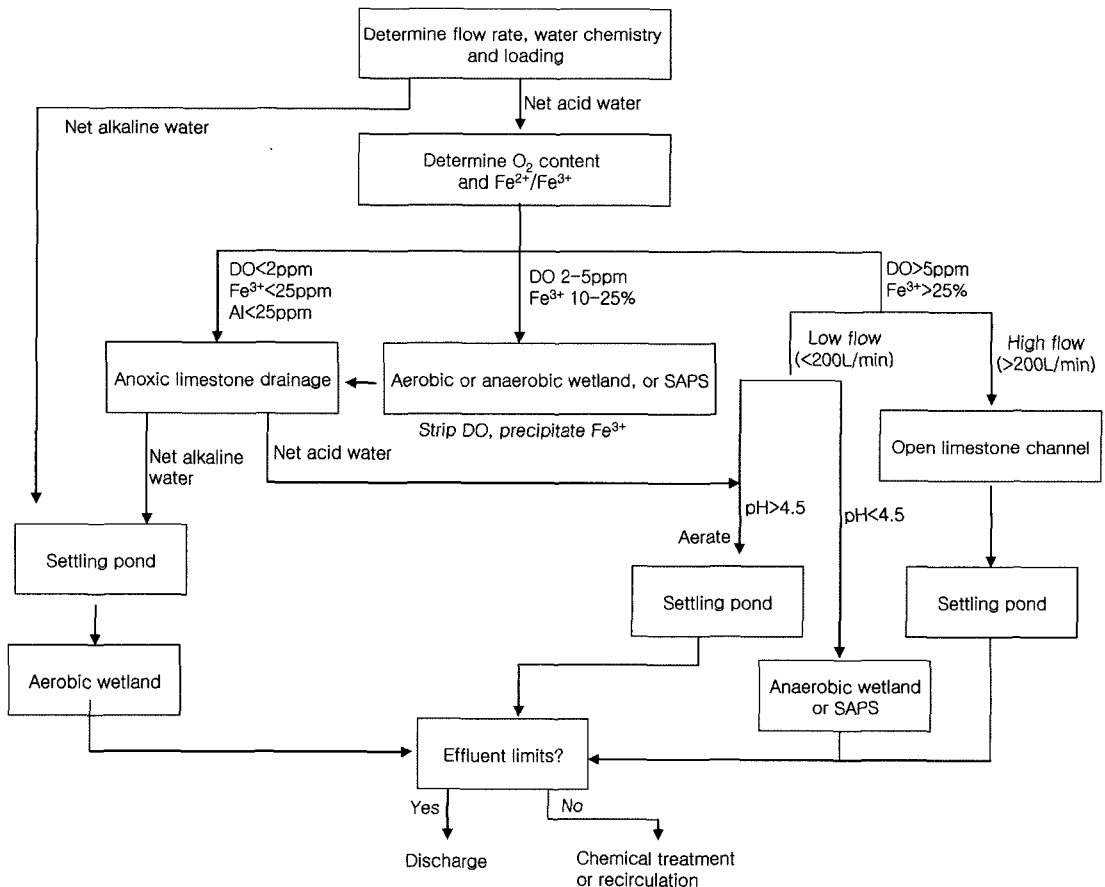


Fig. 10. Flow chart for the application of passive treatment techniques (after Hedin *et al.*, 1994).

용출된 Fe^{2+} 가 산소와 반응하거나 미생물의 활동에 의하여 생성된다. 특히 미생물의 활동에 의한 산화가 산소에 의한 산화보다 수만 혹은 수십만 배 높은 것으로 알려져 있다(Colmer *et al.*, 1950). 미생물의 활동을 억제하는 살균제를 산성배수를 발생시키는 암석 혹은 폐기물에 첨가하여 황화광물의 산화를 억제하고 산성배수의 발생을 저감시킬 수 있다(Sobek *et al.*, 1990). 살균제를 이용한 산성배수 발생억제기술은 주기적으로 살균제를 살포하여야하고 살포된 살균제에 의한 2차 환경오염문제가 유발될 수 있어 현장 활용에 많은 제약이 있다.

산화제의 황화광물 접촉차단기술은 물리적 기법과 표면코팅기법으로 나눌 수 있다. 물리적 기법은 산성배수를 발생시키는 암석과 폐기물을 대기와 용존산소를 함유한 물로부터 격리시키는 방법이다. 지하공동 차폐저장, 수막 저장(Blowes *et al.*, 1991; Nicholson *et al.*, 1989), clay liner, plastic liner, cement layer 혹은 asphalt를 이용한 지상차폐(Byerly, 1996; Healy and Robertson, 1989; Nicholson *et al.*, 1989), 시멘트 등을 이용한 고형화(Benzaazoua *et al.*, 2004; Jang and Kim, 2000) 등이 대표적인 기법이다.

황화광물 표면코팅기법은 황화광물 표면에 산화제의 접촉을 차단하는 코팅을 형성시켜 황화광물의 산화를 방지하여 산성배수의 발생을 억제하는 방법이다(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). 코팅 형성제는 유기물과 무기물로 대별된다. 유기물은 황화광물 표면에 흡착되어 소수성 코팅을 형성함으로써 산소와 Fe^{3+} 의 표면접촉을 차단하고 흡착된 유기물은 환원제 역할을 하여 표면에서 산화제를 환원·차단한다. 무기물 코팅 형성제는 산화제, 인산염 혹은 규산염, 중화제로 이루어져 있으며 산화제는 황화광물의 표면을 산화시켜 표면으로부터 금속 이온을 용출시키고 용출된 금속이온은 인산염 혹은 규산염과 반응하여 황화광물 표면에 안정한 침전물을 생성하여 코팅을 형성한다. 중화제는 산화제에 의한 황화광물의 표면산화과정에서 생성된 산성배수를 중화하고 용출된 금속이온을 수산화물로 표면에 침전시켜 금속수산화물의 코팅을 형성한다. 따라서 무기물을 이용한 코팅처리 는 황화광물 표면에 금속-인산염 혹은 규산염과 금속수산화물의 코팅이 동시에 생성된다. 이러한 과정을 통하여 생성된 코팅은 황화광물의 산화제인 산소와 Fe^{3+} 의 표면접촉을 차단하는 물리적인 차단막 역할을

하여 황화광물의 산화를 차단하고 산성배수의 발생을 억제한다.

5. 결 론

광산지역에서 발생하는 산성배수 문제에 대하여 지구과학 분야에서 많은 연구가 진행되어 폭넓은 과학적 이해가 이루어졌으며, 문제해결을 위한 많은 기술이 개발되어 현장에 성공적으로 적용되고 있다. 최근 건설현장에서 산성광산배수와 동일한 기작에 의하여 발생하는 산성배수가 건설 분야 현안문제로 대두되고 있다. 토목건설 분야에서 산성배수는 생소한 분야로서 원인 규명과 적절한 대책수립이 이루어지지 않고 있어 막대한 경제적 피해가 발생되고 있다. 오랜 기간 연구를 통하여 축적된 광산산성배수에 대한 이해와 대책기술을 바탕으로 건설현장의 산성배수에 대한 적절한 평가방법의 확립 및 산성배수 피해저감기술의 개발이 시급하다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 '지질재해피해평가기술 및 대응기술 실용화 사업'과 건설교통부 건설기술혁신사업인 '도로건설 절취사면의 산성배수 발생저감을 위한 피막형성 기술 개발'의 일환으로 수행되었습니다.

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.
- Benzaazoua, M., Marion, P., Picquet, I. and Bussiere, B. (2004) The use of pastefill as a solidification and stabilization process for the control of acid mine drainage. *Minerals Engineering*, v. 17, p. 233-243.
- 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.
- Brady, K., Smith, M.W., Beam, R.L. and Cravotta C.A. (1990) Effectiveness of the use of alkaline materials at surface coal mines in preventing or abating acid mine drainage: Part 2. Mine site case studies. 1990 Mining and reclamation conference, West Virginia Univer., Morgantown, WV.
- Byerly, D.W. (1996) Handling acid-producing material during construction. *Environmental and Engineering Geoscience*, v. 2, p. 49-57.
- 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.
- Colmer, A.R., Temple, K.L. and Hinkle, M.E. (1950) An iron oxidizing bacterium from the acid drainage of some bituminous coal mines. *J. Bacteriol.*, v. 59, p. 317-328.
- Evangelou, V.P. (2001) Pyrite microencapsulation technologies: principles and potential field application. *Ecological Engineering*, v. 17, p. 165-178.
- Evangelou, V.P., Seta, A.K. and Holt, A. (1998) Potential role of bicarbonate during pyrite oxidation. *Environ. Sci. Technol.*, v. 32, p. 2084-2091.
- Floyd, M., Czerewko, M.A., Cripps, J.C. and Spears, D.A. (2003) Pyrite oxidation in lower lias clay at concrete highway structures affected by thaumasite, Gloucestershire, UK. *Cement and Concrete Research*, v. 25, p. 1015-1024.
- Healy, P.M. and Robertson, A.M. (1989) A case history of an acid generation abatement program for an abandoned copper mine. In: *geotechnical aspects of tailings disposal and acid mine drainage*. The Vancouver Geotechnical Society, BC, Canada.
- Hedin, R.S., Nairn, R.W. and Kleinmann, R.L. (1994) Passive treatment of coal mine drainage. US Bureau of Mines. Information Circular 9389.
- 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.
- Jang, A. and Kim, I.S. (2000) Solidification and stabilization of Pb, Zn, Cd and Cu in tailing waste using cement and fly ash. *Minerals Engineering*, v. 13, p. 14-15.
- 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.
- Kargbo, D.M. and He, J. (2004) A simple accelerated rock weathering method to predict acid generation kinetics. *Environ. Geology*, v. 46, p. 775-783.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Nicholson, R.V., Gillham, R.W. and Reardon, E.J. (1990) Pyrite oxidation in carbonate-buffered solution: II. rate control by oxide coatings. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, v. 54, p. 395-402.
- Nicholson, R.V., Gillham, R.W. and Reardon, E.J. (1988) Pyrite oxidation in carbonate-buffered solution: I. experimental kinetics. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, v. 52, p. 1077-1085.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- Tagnit-Hamou, A., Saric-Coric, M. and Rivard, P. (2005) Internal deterioration of concrete by the oxidation of pyrrhotitic aggregates. *Cement and Concrete Research*, v. 35, p. 99-107.
- von Willert, F.J. and Stehouwer, R.C. (2003) Compost, limestone, and gypsum effect on calcium and aluminum transport in acid minespoil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 67, p. 778-786.
- 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.

2007년 8월 28일 원고접수, 2007년 10월 16일 게재승인.