

건설현장에서 발생하는 산성암석배수의 발생 예측 및 적용 사례

지상우¹⁾ · 정영욱¹⁾ · 백승한²⁾* · 김윤상²⁾ · 고주인³⁾ · 김선준³⁾ · 임길재¹⁾ · 이현석¹⁾

Prediction of Acid Rock Drainage (ARD) Generation on Construction Sites and Its Application

Sang-Woo Ji, Young-Wook Cheong, Seung-Han Baek*, Yun-Sang Kim, Ju-In Ko,
Sun-Joon Kim, Gil-Jae Yim and Hyeon-Seok Lee

Abstract : This paper presents the damage cases caused by Acid Rock Drainage (ARD) in construction sites, and also acid generation potential tests that can predict the generation of ARD are introduced. Acid generation potential tests are classified into two groups, static test and kinetic test. The static tests such as paste pH test, Acid Base Accounting (ABA) test and Net Acid Generation (NAG) test are widely used among them. This means that static test (ABA test, NAG test) is more applicable in construction site than kinetic test because of simplicity and construction period. The application of the proposed ARD prediction methods would reduce economic costs and the related environmental pollution problems.

Key words : ARD, Static test, Kinetic test, ABA test, NAG test

요 약 : 본 해설논문에서는 건설현장에서 발생하는 산성암석배수(Acid Rock Drainage, ARD)에 의한 국내외의 피해사례와 산성암석배수의 발생을 예측할 수 있는 산발생 능력 시험방법에 대해 살펴보았다. 또한 국내 건설현장에서 이러한 시험방법의 적용 사례를 검토하였다. 국내 산성암석배수의 발생과 관련된 산발생 능력 시험 중 현장에서 많이 사용되는 방법은 정적인(static) 방법으로, paste pH 시험과 산 염기 평가(Acid Base Accounting, ABA) 시험 및 순 산발생량 평가(Net Acid Generation, NAG) 시험 등이 있다. 이는 정적인 방법이 동적인(kinetic) 방법보다 비교적 빠르게 산발생 능력을 평가할 수 있어, 공사기간이 정해진 건설현장에서 적용성이 높기 때문에 판단된다. 국내 건설현장에서 진행되고 있는 산발생 능력 평가의 해석은 주로 ABA 시험과 NAG 시험의 결과를 결합하여 해석하고 있다. 이는 단독시험 결과보다 정확한 산발생 능력을 평가할 수 있기 때문이다. 산발생 능력 시험을 통한 ARD 발생 예측으로, 향후 건설현장에서 발생될 수 있는 경제적 손실을 줄일 수 있으며, 주변 환경오염 문제를 보다 완화시킬 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 산성암석배수, 정적인 방법, 동적인 방법, 산 염기 평가 시험, 순 산발생량 시험

서론

일반적으로 산성암석배수(Acid Rock Drainage, ARD)는 산성광산배수(Acid Mine Drainage, AMD)라 하여 광산지역에서 많이 발생되어 광산지역에 국한된 문제로만 인식되어져 왔다. 그러나 최근 ARD는 공항 및 도로

건설, 채석장, 벌목장 등 건설공사가 황화광물을 수반한 지층 및 광산지역을 통과할 경우 빈번히 발생하고 있다. 이러한 ARD에 의한 영향은 pH가 낮은 산성수에 중금속이 포함되어서 심각한 환경오염 문제를 야기시키고 또한 ARD의 강한 산성으로 콘크리트 부식, 고농도의 황산염 팽창에 의한 구조물 바닥의 균열 발생과 절개지에서 사면 불안정 등의 공학적인 피해를 초래할 수도 있다(Orndorff, 2001; 이규호 등, 2005).

건설현장에서의 ARD의 문제는 대부분 공사가 어느 정도 진행된 후 발생되며, 발생된 이후 처리에는 많은 비용이 소요되어 해결에 많은 어려움이 따른다. 따라서 건설공사 설계시부터 황화광물에 의한 ARD의 발생을 사전 예측 조사하여 적절한 대책을 마련하는 것이 바람직할 것이다. ARD가 발생할 수 있는 암석을 사전에 판

2007년 1월 29일 접수, 2007년 2월 5일 채택

- 1) 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
- 2) 광해방지사업단 광해관리본부 수질개선팀
- 3) 한양대학교 공과대학 지구환경시스템공학과

*Corresponding Author(백승한)

E-mail: shbaek@mireco.or.kr

Address: Mine Reclamation Corp., Korea Coal Center, 80-6, Susong-dong, Jongno-gu, 110-727, Seoul, Korea

별할 수 있는 방법들로 paste pH 시험, 산 염기 평가 (Acid Base Accounting, ABA) 시험, 순 산발생량 평가 (Net Acid Generation, NAG) 시험, Modified ABA procedures, Carbonate Neutralization Potential determinations, Humidity cell tests, Column tests, Batch reactor (Shake flask) tests, Field tests 등 여러 가지 방법들이 연구되어 왔다(Orava, 1997; USEPA and Hardrock Mining, 2003). 이러한 방법들은 광산개발과정에서 발생하는 황화광물을 함유하는 폐석에 대해 적용되어 온 방법들이었으나, 최근에는 건설공사에 까지 적용이 확대되고 있다(Surface Mine Drainage Task Force, 1979; Sobek, et al., 2000). 이러한 ARD 평가방법의 건설공사 분야에 대한 적용은 국내에서도 다양하게 시도되고 있다(지상우와 정영욱, 2005; 임길재 등, 2006). 본 해설논문에서는 ARD의 발생을 사전에 예측할 수 있는 평가법과 특징을 소개하고 평가법의 적용 사례를 통해 ARD의 환경적 영향과 발생 예측의 중요성을 재조명해 보고자 하였다.

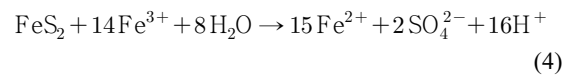
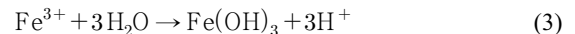
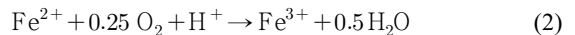
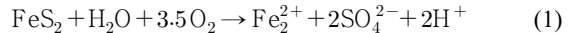
산성암석배수(ARD) 발생과 피해사례

ARD 발생기작

건설현장에서 발생하는 ARD는 황화광물이 함유된 지층이 굴착, 절취 등에 의해 지표로 노출되면서 대기 중의 산소 및 지표수와 반응에 의해 생성된다. 황화광물 중에는 황철석(pyrite)이 가장 많이 분포하기 때문에 황철석은 ARD 생성의 주된 원인으로 인지되고 있다. 이밖에도 자류철석(pyrrhotite), 백철석(marcasite), 황동석(chalcopyrite), 유비철석(arsenopyrite)과 같은 황화광물이 지표에 노출되어 황산을 생성시켜 주변 자연수의 pH를 낮추고 Al, Mn, Zn, Cd 및 Pb 등의 용출로 중금속으로 오염된 ARD가 생성될 수 있다(Lee, 1999).

황철석의 산화반응은 다음의 식과 같다. 식(1)에서 보듯이 황철석은 공기와 물과 반응하여 2가철과 황산염 및

산을 발생시키고, 2가철은 식(2)의 반응과 같이 공기와의 접촉만으로 3가철로 산화된 후, 이는 식(3)과 같이 산소 없이 물만 존재해도 철수산화물을 침전시키면서 수소이온을 배출함으로 빠르게 산성화시킨다. 이러한 철수화물은 수로 및 주변에 노란색 혹은 적색의 퇴적물을 생성시키는데 이를 yellow boy 현상이라고 한다. 또한 식(4)와 같이 3가철은 산화제로 작용하여 다시 2가철과 산도(acidity)를 형성하는 과정을 잘 보여주고 있다.



국내·외 사례

다량의 황철석을 함유하는 변성안산암이 분포하는 경남 W지역의 택지조성 개발지역에서는 택지개발 과정에서 굴착된 암석과 토양 내에 포함되어있던 황철석이 산화되면서 ARD가 발생되어 Fig. 1과 같이 미관을 해칠 뿐만 아니라 구조물의 부식에 의해 안전성에도 문제가 우려되었다.

충북 B지역은 국내 토목공사 과정에서 발생한 ARD 문제로 가장 대표적인 사례로 알려진 곳이다. 이 지역의 건설 구간 내의 지질은 변성퇴적암류가 대상으로 분포하는 옥천지향사대의 지질구조를 갖고 있어 점판암, 천매암 및 흑색 셰일이 포함된 지층들이 분포하고 있다. 따라서 터널 시공 과정에서 굴착된 암벽력 내에는 다량의 황철석이 함유되어 있으며, 이로 인해 ARD가 발생되어 주변 농경지 및 식수 오염이 우려되었고 민원으로 공사 진행에 막대한 차질과 추가적인 비용이 발생되고 있다. 터널 구간 이외에도 본 고속도로 건설 구간의 여러 곳에서 터널굴착에 의해 발생한 암벽력을 이용한 성토부와 절토부 사면 곳곳에서 ARD가 발생되어 구조물 부식, 지하수



Fig. 1. 경남 W지역에서 발생하는 ARD.



Fig. 2. 충북 B지역에서 발생하는 ARD 및 황화광물 산화작용 흔적.



Fig. 3. 전북 M지역 절개지 주변 황화광물 산화작용 부산물 흔적.

오염, 경관 훼손 등의 문제가 발생하고 있다(Fig. 2).

2006년 개통된 대구-부산간 고속도로 시점부 부근에는 변성 퇴적암류가 분포하고 중점부 부근에는 변질 안산암류가 분포하고 있다. 고속도로의 시점부와 중점부 곳곳의 암반절취사면에서 다량의 철분이 산화되어 적갈색 침전물을 형성한 암석배수가 발생한 사례가 있다.

옥천층군의 변성퇴적암으로 구성된 대전-통영간 고속도로 구간 중 전북 M지역에서는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 도로절개지 법면 및 콘크리트 옹벽, 배수로에 황갈색의 철 산화물의 흔적이 관찰되며, ARD로 인한 구조물 부식 등의 문제가 발생하고 있다.

국의 대표적인 ARD유출 사례로는 2003년 미국의 펜실베이니아주 99번 고속도로 건설과정에서의 발생으로 ‘스카이탑(Sky-top)’ 사건이라고도 불린다. 도로건설과

정에서 절토된 암석들이 도로 성토부에 이용하면서 pH 3 이하의 Zn과 Pb 등의 중금속을 다량 함유하는 ARD를 발생시켜 민원에 의해 고속도로 공사가 중단된 사건이다. 이에 대책마련을 위한 많은 연구비와 공사비가 투입되고 있다(Skeiyy and Loy, INC., 2004; Hammarstrom, 2005).

또 다른 사례로는 공항을 건설하면서 막대한 양의 황화광물 슬레이트가 노출되어 공항 부지 인근 수계를 ARD로 오염시킨 캐나다 Nova Scotia의 Halifax 국제공항 건설공사(1955~1960년)를 들 수 있다. 이 일로 폐석 복토, 수처리시설, 정화용 소택지 등 환경오염 방지비용으로 1980년대 초까지 1백만불 이상의 환경비용이 소요되었고, 1982년 이후 매년 24만불이 운전 및 관리비용으로 사용되고 있다(Omdorff, 2001). 2003년에는 700만불

의 비용을 들여 수처리시설을 건설하기도 하였다(SGE Acres LTD., 2004).

산발생 능력 평가 방법

암석내 황화광물에 의한 산발생 능력(acid generation potential)을 평가하는 방법은 크게 정적인(static) 방법과 동적인(kinetic) 방법으로 구분할 수 있다. 정적인 방법은 석탄광 폐기물의 산발생 능력을 결정하기 위해 개발되었으며, 이후 금속 광산 산업에 사용하기 위해 적합하게 수정되어 왔다. 반면에 동적인 방법은 산화작용(oxidation process)의 반응속도(rate)와 시기(timing)에 관한 정보를 획득하기 위해 개발되었다(Lee, 1999). 정적인 방법은 총 산발생 능력(total acid generating potential)과 총 산 소비 능력(total acid consuming potential)을 결정하여 암석의 산발생 능력을 예측하기 위하여 사용되어져 왔으며, 동적인 방법은 자연 풍화작용(natural weathering process)이 가속되도록 설계함으로써 오랜 시간 동안의 산발생과 소비에 관한 정보를 구할 수 있다(USEPA and Hardrock Mining, 2003).

정적인 방법

정적인 방법 중 현재 가장 많이 사용되고 있는 방법은 Sobek 등(1978)에 의해 개발된 paste pH 시험과 산 염기 평가(ABA) 시험, Miller 등(1997)에 의해 개발된 순 산 발생량 평가(NAG) 시험이 있다. 이 밖에도 Modified ABA procedures(Lawrence and Wang, 1997), Carbonate Neutralization Potential determinations 등의 방법들이 있다.

paste pH 시험

Paste pH 시험은 시료를 물과 함께 혼합하고 일정시간 경과 후, 이 물의 pH를 측정하여 시료에 의한 순 산성화(net acidification)에 대한 능력을 평가하는 방법이다(USEPA and Hardrock Mining, 2003). 현재 가장 널리 사용되고 있는 paste pH 시험은 pH_{1:2} 측정으로 시료와 증류수를 1:2(w/w) 비율로 섞어서 12시간 경과 후, pH를 측정하는 방법이 있다.

산 염기 평가 시험

암석내 황화광물에 의해 산을 발생시키는 능력이 이를 중화시킬 수 있는 능력보다 크다면 이 암석은 산을 발생시킬 능력이 큰 것으로 판단할 수 있다. 산 염기 평가 시험은 이와 같은 원리로 암석내 총 황(total sulfur) 함량을 이용한 산발생 능력과 이를 중화시킬 수 있는 산중화 능

력의 측정으로 구성된다. 일반적으로 산 염기 평가 시험은 산발생 능력(Acid Potential, AP)과 산중화 능력(Neutralization Potential, NP)을 측정해 이들의 차이 또는 이들의 비를 이용해 나타낸다(Sobek et al., 1978). AP와 NP는 보통 kg CaCO₃/ton 혹은 ton CaCO₃/1000ton 단위로 표시를 하고, AP/NP 값이 1보다 크면 산 발생 능력이 존재하는 것으로 알려져 있다.

AP는 건조된 암석 시료(200mesh 이하)에 질산(HNO₃), 과염소산(HClO₄), 염산(HCl) 등을 가해 시료내 존재하는 가용성 염류와 금속(Fe, Al 등)을 증발, 용해, 침전, 여과, 회화 등의 방법을 거쳐 제거하고 최종적으로 황의 함량만을 구하여 식(5)에 의해 계산할 수 있다.

$$AP \text{ (kg CaCO}_3\text{/ton)} = \text{total S(\%)} \times 31.25 \quad (5)$$

NP의 측정은 건조된 암석 시료(60mesh 이하)에 염산을 가해 시료내 CaCO₃의 존재 유무를 대략적으로 판단할 수 있는 fizz test를 수행하고, 그 결과에 따라 다시 염산을 가하여 반응시킨 후 수산화나트륨(NaOH) 용액을 가하여 pH 7이 될 때까지 주입하여 염산과 수산화나트륨 용액의 용량 차이와 농도를 이용해 식(6)로부터 계산할 수 있다.

$$NP \text{ (kg CaCO}_3\text{/ton)} = \text{ml of acid consumed} \times 25 \times N \text{ of acid} \quad (6)$$

$$\text{ml acid consumed} = \text{ml acid added} - \text{ml base added} \times C$$

$$C = \text{ml acid in blank} / \text{ml base in blank}$$

순 산발생량 평가 시험

순 산발생량 평가 시험은 황화물-황(sulfide sulfur) 함량이 1.5% 이하이고, 구리(Cu)와 같이 과산화수소(H₂O₂) 분해를 촉진할 수 있는 금속원소의 함량이 적은 시료에 적합하다. 순 산발생량을 측정하기 위해서는 시료(200mesh 이하)에 15% 과산화수소를 첨가하여 80~90°C에서 반응시킨 후 pH를 측정하고 이를 NAGpH로 정한다. NAGpH에 따라 적당한 수산화나트륨 용액(0.1M or 0.5M)을 주입하여 pH가 4.5 및 7까지 적정한 후 다음의 식(7)을 이용하여 NAG를 구할 수 있다. 일반적으로 pH 4.5까지는 Fe와 Al 및 대부분의 수소이온(H⁺)에 기인한 산도를 의미하며, pH 4.5~7까지는 Cu, Zn과 같은 용해성 금속 기원의 산도를 의미한다(Lawrence et al, 1988).

$$NAG \text{ (kg H}_2\text{SO}_4\text{/ton)} = (49 \times V \times M) / W \quad (7)$$

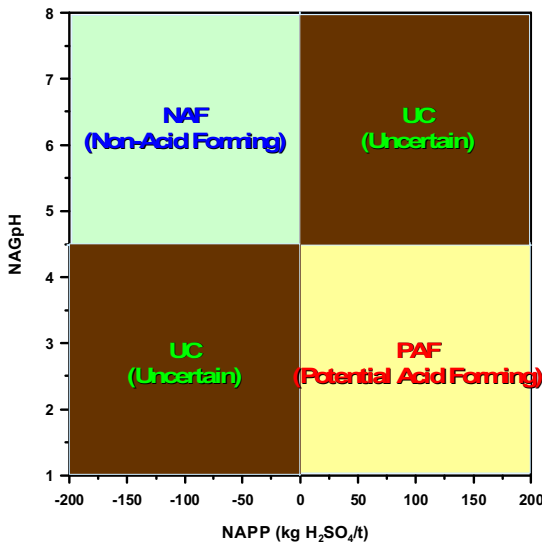


Fig. 4. 산발생 능력 평가 결과.

여기서, V는 적정에 사용된 수산화나트륨 용액의 양 (ml), M은 수산화나트륨 용액의 농도(moles/L) 그리고 W는 시료의 무게(g)이다.

정적인 방법을 이용한 결과의 해석

위에서 언급한 ABA 시험과 NAG 시험의 결과를 종합해 암석의 산발생 여부를 쉽게 판별할 수 있는 방법은 ABA 시험을 통해 얻을 수 있는 순 산발생 능력(Net Acid Producing Potential, NAPP) 값과 NAG 시험을 통해 얻을 수 있는 NAGpH 값을 함께 도시하는 방법이다. 이처럼 시험 결과를 도시하면 Fig. 4와 같이 암석은 크게 세 분류로 구분된다. 첫째는 산을 발생시키지 않는 시료군(Non-Acid Forming, NAF), 둘째는 산을 발생시킬 수 있는 시료군(Potentially Acid Forming, PAF), 마지막은 산 발생 가능 여부가 불분명한 시료군(Uncertain, UC)이다.

순 산발생 능력은 총 황 함량을 이용한 최대 산발생 능력과 Acid Neutralization Potential(ANC)을 이용하여 다음 식(8)과 같이 구할 수 있다. ANC는 Sobek 등(1978)이 제안한 NP의 측정과 동일하게 진행되나, 단위를 kg H₂SO₄/ton으로 사용한다. 이는 다른 측정값과의 비교를 위함이며, MPA 역시 총 황 함량이 황철석 황으로 존재한다고 가정하여 kg H₂SO₄/ton의 단위로 사용한다.

$$\begin{aligned} \text{NAPP (kg H}_2\text{SO}_4\text{/ton)} &= \text{MPA} - \text{ANC} \\ \text{MPA (kg H}_2\text{SO}_4\text{/ton)} &= \text{total S(\%)} \times 30.6 \end{aligned} \quad (8)$$

동적인 방법

동적인 방법을 이용한 산발생 능력 평가 방법은 현장 조건에 맞는 자연 산화 작용을 모사하기 위하여 시도된다는 점에서 정적인 방법과 뚜렷한 차이를 보인다. 동적인 방법은 일반적으로 정적인 방법보다 더 많은 시료가 사용되고 더 오랜 시간이 요구되는 반면에, 황화광물의 산화반응에 대한 정보를 알 수 있어서 산발생량뿐만 아니라 유출수의 수질 정도를 파악할 수 있다(USEPA, 1994). 동적인 방법으로는 Humidity cell tests, Column tests, Batch reactor(Shake flask) tests, Field tests 등이 있다.

Humidity cell tests

Humidity cell test는 Sobek 등(1978)에 의해 개발된 bench-scale test로 2 mm 이하의 입도를 갖는 비교적 적은 양(200~300g)의 시료를 이용한다. 밀봉된 플라스틱 박스에 시료를 넣고, 건조한 공기와 습한 공기를 이용해 각각 3일 동안 반응시킨다. 이후 7일째 되는 날에는 물을 뿌려 시료와 반응한 물을 채취하여 pH, 전기전도도(electrical conductivity), 알칼리도(alkalinity) 등을 측정하고 황산염이온과 금속이온을 분석한다. 이때 사용되는 물은 지역의 산성비와 유사한 조성을 갖게 하기 위해 다소 낮은 pH로 조정하여 사용해야 한다(USEPA and Hardrock Mining, 2003).

Column tests

Column test는 실린더 혹은 실린더와 유사한 용기에 산발생 능력을 알고자 하는 시료를 채워서 수행하게 된다. Column에 물을 뿌려줌으로써 내부는 건조한 상태와 습한 상태가 주기적으로 변하게 된다. 이 주기는 일반적으로 3일 정도를 각각 유지하게 되나, 5~7일 혹은 일주일 이상을 유지하기도 한다(USEPA, 1994). Column test는 Humidity cell test와 유사하게 수행되지만 상향류식(upflow)의 흐름을 갖고 일반적으로 column 내부에 물을 가득 채움으로써 시료 사이의 공기 이동을 차단하는 특징이 있다. Column은 일반적으로 15 cm 정도의 직경과 2 m 이상의 길이를 갖고, 내부에는 2 cm 이상의 입도를 갖는 시료를 충전시킨다.

동적인 방법을 이용한 결과의 해석

동적인 방법의 해석은 시료의 광물학적 지식, 정적인 시험의 결과, 입도 크기, 유입된 물의 흐름(속도와 유량) 등에 기반을 둔다. Bench-scale의 동적인 시험을 통해 산발생 능력을 정량적으로 평가하기 위해서는 시험규모의 비례 축소화(scaling)가 중요하다. 이러한 시험을 진행하

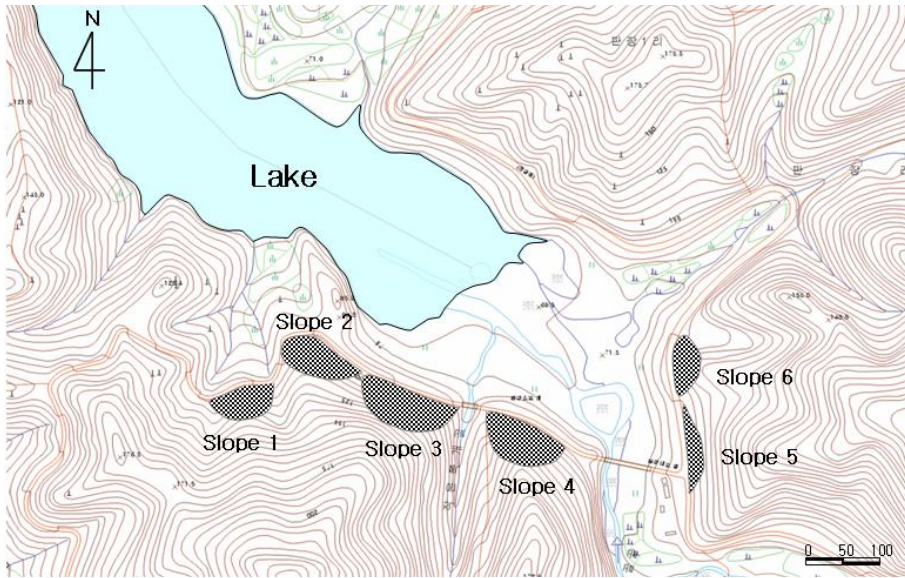


Fig. 5. 연구지역의 주변 정보.

기 위해서는 입자 크기, 반응 면적(reactive surface area), 침투율(infiltration rate), 부피, flushing rate 등을 포함하여야 한다. 동적인 방법을 통해 산 발생 능력을 평가하기 위해서는 일반적으로 발생된 ARD의 pH, 황산염 이온의 농도, 산도, 알카리도, 미량금속(trace metal)이온의 농도 등 시간적인 수질 변화 양상을 이용한다.

ARD 발생 예측 적용 사례

충북 B 지역

충북 B 지역은 남한의 중앙부에 위치하여 최근 동서를 잇는 도로건설이 진행되고 있다. 전술한바와 같이 이 지역 도로건설 구간 곳곳에서 ARD의 발생으로 인한 피해 사례들이 나타나고 있다. 따라서 이 지역에 대한 ARD 발생 예측 및 억제방안에 대해 여러 연구가 진행되고 있다(지상우와 정영욱, 2005; 지상우 등, 2006a; 한동열, 2007). 본 절에서는 두 가지 연구 사례를 소개한다.

절취사면 암석에 대한 ARD 발생 예측

본 지역의 호수주변에서 수행된 도로확장 공사에서 발생한 절취사면과 주변 쇄설물, 호수퇴적물에 대한 산발생 능력 평가 연구가 진행된 바 있다(지상우 등, 2006a). 이 연구에서는 도로확장에 의해 암반이 노출된 도로변 절취사면 6개소에서 암석시료 24개를 채취하였으며, 주변 제방에서 쇄설물 4개, 호수퇴적물 3개 총 31개의 시료를 채취하여 이들의 산발생 능력을 평가하였다. Fig.

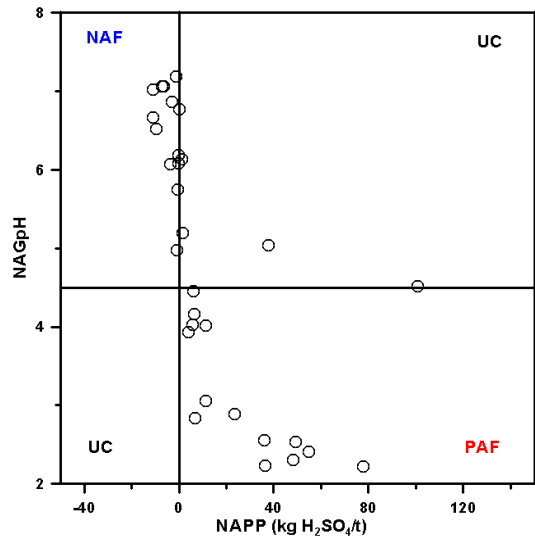


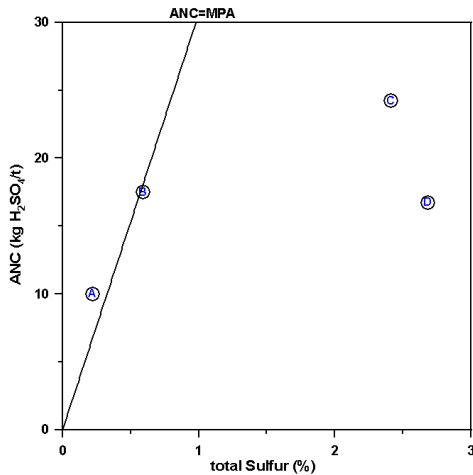
Fig. 6. NAPP와 NAGpH를 이용한 암반 분류.

5는 이 연구가 진행된 지역의 사면 위치와 주변 정보를 제공해 준다.

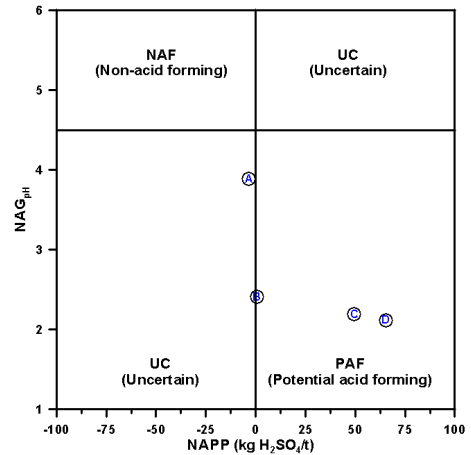
이 연구에서는 채취된 시료를 이용하여 자유 수소이온 및 염의 함량을 평가할 수 있는 pH_{1.2} 및 EC_{1.2} 분석을 수행하고, 산발생 능력을 평가하기 위해 ABA 및 NAG 시험을 수행하였다. 연구 수행 결과로 각 절취사면에 대한 ARD 발생 위험도를 제시하였으며, 절취사면의 암석과 주변 쇄설물, 호수 퇴적물의 pH_{1.2}, NAPP 및 NAGpH

Table 1. 성토재에 대한 ARD 예측 결과

No.	Rock type	pH _{1.2}	EC _{1.2}	ANC kg H ₂ SO ₄ /t	Sulfur content(%)	MPA kg H ₂ SO ₄ /t	NAPP kg H ₂ SO ₄ /t	NAGpH	ANC /MPA
A	phyllite	3.54	386.0	10.00	0.22	6.61	-3.39	3.89	1.51
B	phyllite	4.05	535.0	17.50	0.59	18.12	0.62	2.41	1.05
C	schist	2.56	2660.0	24.25	2.41	73.75	49.50	2.19	0.33
D	coal shale	3.40	1415.0	16.75	2.68	82.01	65.26	2.12	0.20



(a) MPA와 ANC에 의한 산 발생 능력



(b) NAPP와 NAGpH에 의한 암반 분류

Fig. 7. 충북 B 지역의 ARD 발생 예측 결과.

값의 측정을 통해 산발생 능력을 평가하였다(Fig. 6).

연구지역의 6개 사면에 대한 ARD 발생 위험도 분석 결과, 평균 2.16, 0.22, 5.22, 7.54, 1.28 및 5.67로 한 개의 사면을 제외한 모든 사면에서 ARD가 발생될 것으로 예측되었다. 또한 호수변에 노출된 쇄설물은 pH_{1.2}가 3.07~3.39, NAPP가 3.9~11.48 kg H₂SO₄/ton 그리고 NAGpH가 2.08~4.46으로 산발생 능력이 있는 것으로 나타나 호수 수위가 오르게 되면 호수물과 반응하게 되어 산성수를 발생시킬 수 있는 것으로 평가되었다.

성토재 ARD 발생 평가 및 억제방안 연구

본 지역을 횡단하는 고속도로 건설 구간은 옥천지향사지대의 변성 퇴적암지대를 지나가게 되어 터널굴착이나 암반절취에 의해 지층 내에 함유된 황화광물이 노출되어 ARD를 발생시킬 수 있는 구간이 존재하는 것으로 판단된다. 해당 공사구간에서 발생하는 절취된 암석은 고속도로 일부구간의 성토재로 사용하도록 결정되어있어 성토부에서 산성의 침출수가 발생될 가능성이 있다. 따라서 성토재로 사용될 절취암석구간에 대해 사전에 ARD

발생 평가를 수행하고, 성토재의 알칼리 요구량을 산정하여 알칼리를 혼합하여 시공할 수 있는 방안이 제시되었다.

사용된 성토재는 4종으로 각각의 성토재에 대해 ARD 평가를 수행한 결과 성토재 A를 제외한 모든 성토재가 ARD 발생 우려가 높은 것으로 판단되었다. 성토재 A 또한 산중화 능력이 높긴 하나 pH_{1.2}과 NAGpH 값을 통해 볼 때 ARD를 발생시킬 가능성이 높다(Table 1, Fig. 7).

Sobek 등(1978)이 제시한 수산화칼슘(Ca(OH)₂) 이용법을 사용하여 성토재의 알칼리 요구량을 산정하였다. 토양에 Ca(OH)₂를 첨가하면 먼저 토양수를 중화시키고 토양입자를 중화시킨다. 보통 1000 ton의 물질에 대해 1 ton의 분쇄된 석회암으로 중화시키는 양(pH = 6.5)은 5 ml의 0.04 N Ca(OH)₂의 양과 동일하므로 이를 이용하여 알칼리 요구량을 측정할 수 있다. 60 mesh(250 μm 이하)로 체질한 시료 10 g을 여러 개의 플라스크에 넣고, 0.04 N Ca(OH)₂를 각각의 플라스크에 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30 ml 방식으로 넣은 후 증류수를 50 ml 넣는다. Hot plate에서 5분간 가열하여 교반 및 냉각시킨 후 용

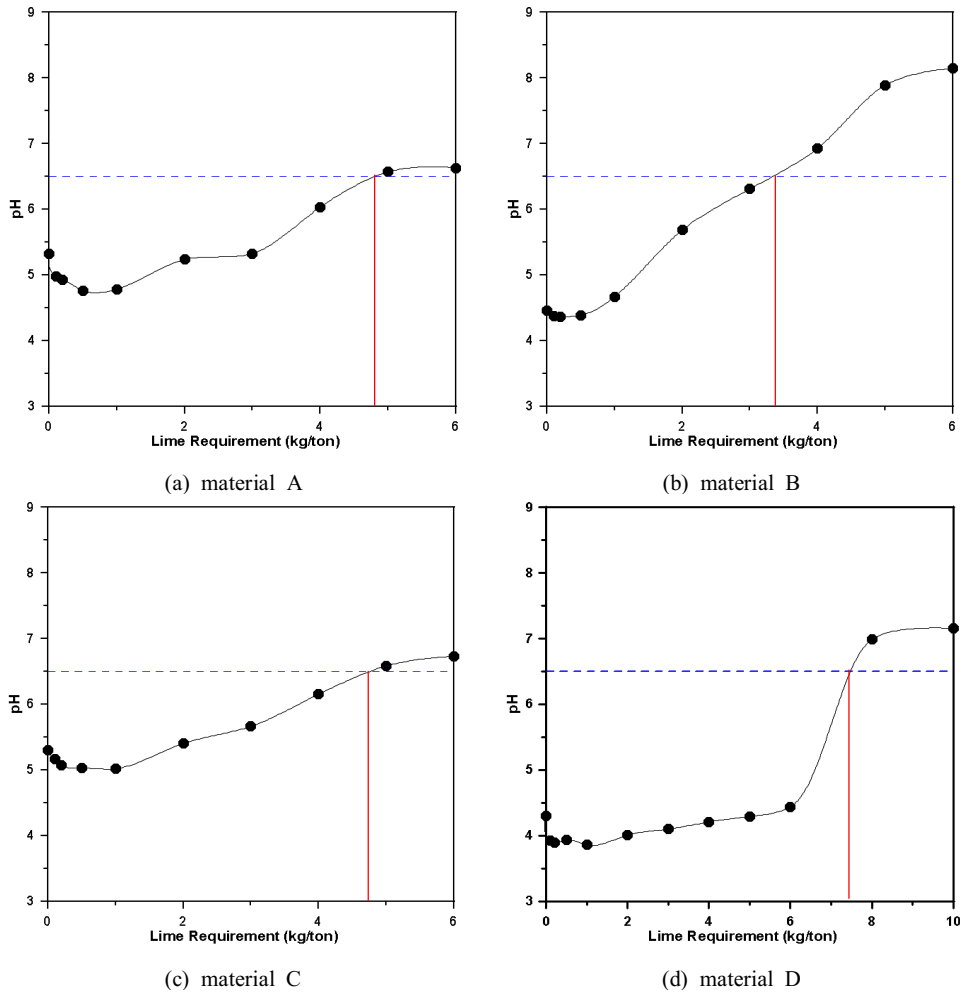


Fig. 8. 각 성토재의 알칼리 요구량.

액의 pH를 측정한다. Y축은 용액의 pH를, X축은 알칼리 요구량(x ton/1000 ton)으로 하여 회귀선을 긋고 pH가 6.5일 때의 알칼리 요구량을 구한다.

알칼리 요구량 산정 결과는 Fig. 8과 같다. 알칼리 공급은 석회석을 성토재와 혼합하는 방법을 취하므로 석회석 필요량으로 표현할 수 있다. 따라서 pH 6.5까지 중화하는데 필요한 석회석의 양(순도 100% 기준)은 성토재 1 ton당 각각 성토재 A 3.5 kg/ton, 성토재 B 5 kg/ton, 성토재 C 5 kg/ton 및 성토재 D 경우 7.5 kg/ton 이상이 필요한 것으로 나타났다.

유치-이양 지역

유치-이양간 도로확장공사에 따라 예상되는 절토사면에서의 ARD 발생 가능성과 이로 인해 발생될 수 있는

주변 지하수 및 지표수의 오염 가능성을 평가하기 위한 연구가 진행되었다(김선준 등, 2005). 이 연구에서는 도로확장공사구간 중 두 지점에 함탄층이 존재하는 것으로 확인 되어 두 지점에서 시추된 코어를 통해 26개의 암석 시료를 채취하였으며, 시추공 주변에서 암석 시료를 채취하여 산발생 능력을 평가하였다. 평가 방법으로는 pH_{1.2}와 ABA 시험을 수행하였다.

이 연구에서의 pH_{1.2} 분석결과, 시추 코어는 4.08~4.65의 범위를 보여 함탄층의 노출에 의해 ARD가 발생될 것으로 예상하였다. 또한 ABA 시험 결과, 대부분의 시료가 AP/NP 값이 1보다 높게 나타나 산발생 능력이 있는 것으로 조사되었다. Table 2는 이 연구에서 수행된 ABA 시험의 결과 중 일부를 보여주고 있다.

Table 2. 유치-이양 지역의 ABA 시험 결과

Sample No.	Borehole Name	Depth (m)	Rock type	Total S(%)	AP (kg CaCO ₃ /ton)	NP (kg CaCO ₃ /ton)	AP/NP
C21	BB-36	6.6	black shale	1.280	40.00	7.14	5.60
C22		7.0	black shale	0.921	28.78	9.91	2.90
C23		8.0	coal shale	2.420	75.63	5.53	13.68
C24		8.3	black shale	1.090	34.06	11.45	2.97
C25		11.0	shale	1.240	38.75	11.33	3.42
C26		13.6	quarts schist	0.625	19.53	12.87	1.52

Table 3. 전남 K 지역의 ARD 예측 결과

No	Sample	Mineral	pH _{1,2}	EC _{1,2}	ANC (kg H ₂ SO ₄ /t)	S (%)	MPA (kg H ₂ SO ₄ /t)	NAPP (kg H ₂ SO ₄ /t)	NAGpH
1	BH7-12	qz,cl,cc,mu,mic,al,dol	6.67	32.4	127.2	0.082	2.506	-124.72	8.91
2	TB3-62	qz,cl,mu,cc,al,mic,dol	7.21	36.1	113.5	0.066	2.026	-111.45	8.89
3	TB3-65	qz,cl,mu,mic,al,mu	6.66	55.1	64.0	0.117	3.580	-60.38	8.81
4	TB3-125	qz,cl,mu,cc,dol	7.25	32.6	194.6	0.075	2.283	-192.34	8.70
5	CH3-18	qz,cl,mu,cc,al	7.47	30.8	171.2	0.076	2.316	-168.93	8.92
6	CH4-7	qz,al,mic,cl,mu,cc	7.37	30.9	178.1	0.079	2.402	-175.72	8.77
7	TB15-1-4	qz,al,ort,mu	7.85	8.5	9.4	0.082	2.509	-6.91	7.41
8	TB19-1-18	qz,cl,mu,cc	7.24	35.0	158.9	0.078	2.393	-156.47	8.76
9	TB19-1-25	qz,al,cc,mu	7.51	32.9	8.9	0.082	2.521	-6.42	8.45
10	TB19-1-36	qz,mu,cc	7.36	34.6	3.4	0.083	2.525	-0.91	8.70
11	TB19-1-66	qz,al,mic,mu,cc	7.55	46.4	66.5	0.082	2.503	-64.00	8.82
12	TB19-1-78	qz,mu,al,cc,mic	7.45	33.9	13.3	0.074	2.267	-11.04	8.44
13	TAB1-47	qz,cl,mu,al,dol,he	7.22	38.1	68.1	0.076	2.332	-65.75	8.72
14	TAB1-48	qz,cl,mu,mic,al,he	7.29	40.4	34.0	0.073	2.225	-31.81	8.77
15	TB25-13	qz,mu,mic,al,he	7.09	27.4	13.7	0.076	2.310	-11.35	7.97

qz : Quartz, cl : Chlorite, cc : Calcite, mu : Muscovite, mic : Microcline, al : Albite, dol : Dolomite, ort : Orthoclase, he : Hematite

전남 K 지역

전남 K 지역은 사암, 편마암, 셰일 및 석영반암 등으로 구성된 지층이 존재하는데 지질조사과정에서 부분적으로 산화철의 존재가 발견된다. 이 지역의 철도노반 건설 공사가 예정된 구간에 대해 ARD 발생 평가를 수행하였다(지상우 등, 2006b). 공사 예정구간에서 회수된 시추코아 중 풍화정도를 고려해 총 15개의 시료를 채취하였다.

이 연구에서는 XRD 분석결과와 pH_{1,2} 및 EC_{1,2} 측정 결과 등을 Table 3에 나타내었고 ANC, MPA, NAPP, NAG tests 결과를 제시하여 연구지역에서 채취한 시료의 산발생 능력을 평가하였다(Fig 9). 연구결과 모든 시료가 NAF 영역으로 점시되어 산발생 능력이 없는 것으로 조사되었다. 따라서 이 지역에서는 지층이 노출되어도 ARD 발생에 대한 환경오염 및 공학적 피해 가능성이 낮은 것으로 판단하였다.

경남 K 지역

경남 K 지역의 도로건설 예정구간에 대해 ARD 발생

을 예측하였다. 이 연구는 도로설계에 있어서 도로건설 과정에서 발생하는 암반절취 사면과 터널 굴진에 의한 암벽력의 처리 방안을 반영할 수 있도록 수행되었다. 이 지역의 지질은 중생대 백악기 유천층군에 속하는 열변질 안산암과 안산암류, 유문암이 있으며, 이들은 관입한 각섬석 세립질 화강암이 존재한다. 또한 건설 구간 내에 존재하는 폐광산의 방치된 폐석을 관찰한 결과 황철석을 함유하고 있는 것으로 확인되었으며, 변질 안산암 내에도 황철석의 존재가 예상되어 ARD 발생의 예측이 필요하였다.

시료는 절취예정 구간 2개의 사면에서 8개의 암석시료가 채취되었고, 터널굴착 예정 구간에서 시추코아를 이용하여 23개의 시료가 채취되었다. 또한 터널 시점부에 존재하는 폐광산의 폐석시료에 대해서도 산발생 능력을 평가하였다. 시료는 ARD의 발생 우려가 높은 안산암을 중심으로 채취하였고, 일부 구간에서는 화강암 시료가 채취되었다.

Fig. 10에서 보여주듯이 일부 UC부분에 도시된 시료

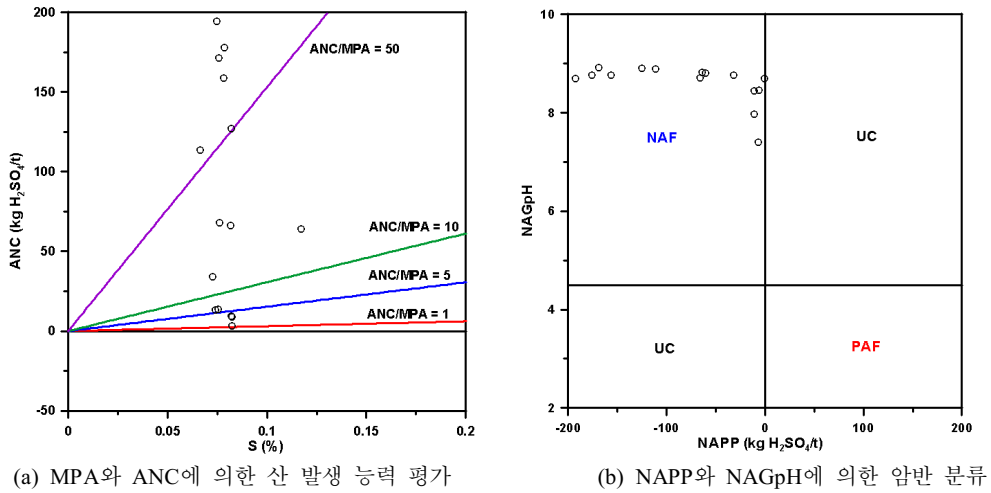


Fig. 9. 전남 K 지역의 ARD 예측 결과.

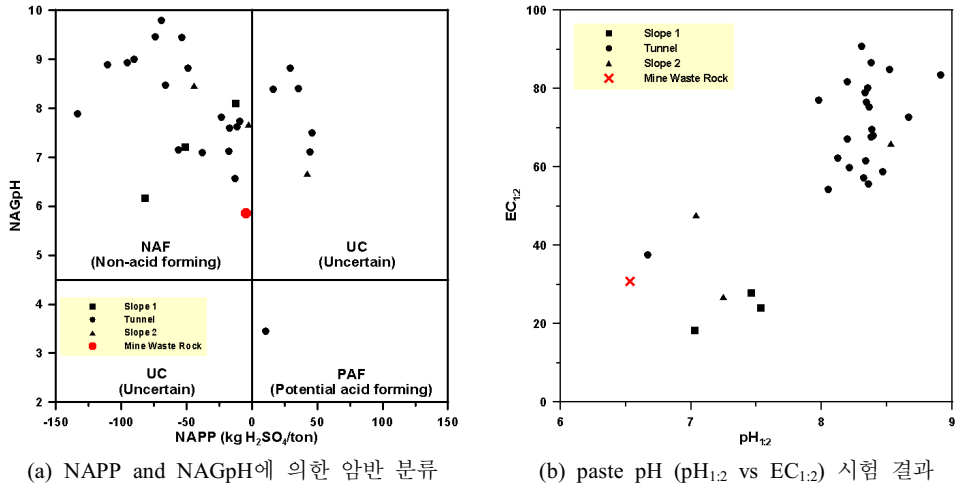


Fig. 10. 경남 K 지역의 ARD 예측 결과.

외에 터널구간에서의 1개 시료를 제외한 모든 시료가 산을 발생시키지 않는 것으로 나타났다. 산발생이 있는 시료는 열수변질대 근접구간에서 수행된 시추 코아 시료로 이는 열수변질대 주변부의 일부 세맥에 존재하는 황철석의 농집 부분에 해당되는 것으로 판단되었다. 본 지역에 대한 정밀 지질조사에서 주로 산발생을 야기하는 열수변질대의 발달 양상은 비반정안산암 분포지역에서 최대폭 200 cm로 존재하나 대부분 지역에서는 수십 cm폭으로 여러 맥이 변질대를 형성하고 있는 것으로 조사되었다. 본 구간내의 안산암내에 황철석의 존재가 확인되나 대부분이 산발생이 없는 것으로 평가되었는데 이는 산을 중화시킬 수 있는 광물 즉, 알칼리를 공급할 수 있는 광물인 방해

석의 존재 때문으로 판단된다. pH_{1:2}와 EC_{1:2}나 NAGpH값에서 8이상의 pH값이 나타나는 경우가 많았는데 방해석의 용해로 인한 알칼리 증가가 원인으로 해석된다.

결론

건설현장에서 발생하는 ARD의 국내의 사례와 이를 예측할 수 있는 시험방법 및 국내 적용사례를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째 ARD는 과거 광산지역에 국한된 문제로 인식되어져 왔으나, 공항건설과 도로 및 철도건설 등의 건설현장에서 빈번히 발생되고 있음을 확인할 수 있었고, 그 원

인은 광산지역과 마찬가지로 황화광물을 수반한 지층이 지표로 노출되어 산화되기 때문이다.

둘째 ARD의 발생과 관련된 산 발생 능력 시험방법은 크게 정적인 방법과 동적인 방법으로 구분되는데, 실제 현장에서는 paste pH 시험, ABA 시험 및 NAG 시험 등의 정적인 방법을 많이 이용하는 것으로 조사되었다. 이는 동적인 방법보다 비교적 빠르게 산 발생 능력을 평가할 수 있기 때문이며, 공사기간이 정해진 건설현장에서의 정적인 방법의 적용성이 동적인 방법보다 더욱 높기 때문이다.

셋째 국내 건설현장에서 진행되고 있는 paste pH 시험, ABA 시험, NAG 시험의 결과해석은 각각의 시험결과를 단독으로 열거하기도 하나, 주로 ABA 시험과 NAG 시험의 결과를 결합하여 해석하고 있다. 이는 결합해석법이 단독시험보다 효과적이고 정확한 산 발생 능력을 평가할 수 있기 때문으로 판단된다.

현재 국내외 건설현장에서 자주 발생되고 있는 ARD 유출은 주변의 환경오염에 주원인으로, 본 해설논문에서 살펴본 산 발생 능력 평가 방법을 통한 ARD 발생 예측으로 향후 건설현장에서 발생될 수 있는 경제적 손실을 줄이고 주변 환경오염 문제를 보다 완화시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 김선준, 고주인, 이상훈, 이현석, 이지은, 2005, *유치-이양간 도로확장공사에 따른 환경오염 평가와 처리방안*, 지오택건설탄트(주), p. 22.
- 이규호, 김재곤, 박삼규, 이진수, 전철민, 김탁현, 2005, “산성암석배수에 의한 절취사면 구조물의 피해 현황과 평가”, *한국지반공학회논문집*, Vol.21, No.5, pp. 83-92.
- 임길재, 정영욱, 지상우, 이현석, 한동열, 박성원, 2006, “경남 일부 지역에 대한 산성암석배수 발생 예측 및 의의”, *한국지구시스템공학회지*, Vol.43, No.4, pp. 350-358.
- 지상우, 정영욱, 2005, “도로 절개지 암석 및 광산 폐석에 대한 산발생 및 부식특성 평가”, *대한토목학회지*, Vol. 25, No.4B, pp. 291-300.
- 지상우, 정영욱, 임길재, 이현석, 2006a, “도로 건설에 의해 노출된 절취사면 암석에 대한 산성암석배수 발생 평가”, *한국지구시스템공학회지*, Vol.43, No.4, pp. 339-349.
- 지상우, 정영욱, 임길재, 민정식, 최용석, 이근병, 황영철, 2006b, “토목건설 예정 지반에서의 산성암석배수 사전 예측”, *대한자원환경지질학회 춘계학술발표회 논문집*, pp. 75-77.
- 한동열, 2007, 도로 암반 절취사면의 산 발생능력 평가에 관한 연구, 강원대학교 석사학위 논문, p. 57.
- Hammarstrom, J.M., Brady, K. and Cravotta, C.A., 2005, “Acid-rock drainage at Skytop, Centre Country”, *Pennsylvania 2004, USGS Open-file report 2005-1148*, p. 44.
- Lawrence, R.W., Jaffe, S. and Broughton, L.M., 1988, *In-House Development of the Net Acid Production Test Method*, Coastech Research.
- Lawrence, R.W. and Wang, Y., 1997, “Determination of Neutralization Potential in the Prediction of Acid Rock Drainage”, *Proceedings of the Fourth International Conference on Acid Rock Drainage*, Vancouver, BC, pp. 15-30.
- Lee, M., 1999, “Management of Sulfidic Mine Wastes and Acid Drainage”, *Handbook*, Australian Centre for Mining Environmental Research (ACMER), September, Australia, pp. 1-13.
- Miller, S., Robertson, A. and Donahue, T., 1997, “Advances in Acid Drainage Prediction Using the Net Acid Generation(NAG) Test”, *Proceedings of the Fourth International Conference on Acid Rock Drainage*, Vancouver, BC, pp. 553-549.
- Orndorff, Z.W., 2001, Evaluation of Sulfidic Materials in Virginia Highway Corridors, Thesis for Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, virginia, USA, p. 175.
- Orava, D., 1997, “In-Pit Disposal for ARD Control, in Short Course Notes on Waste Rock Tailings Disposal Technologies for Reactive Waste Management”, *4th. International Conference on Acid Rock Drainage*, Vancouver, B.C. Canada.
- SGE Acres LTD., 2004, *Halifax International Airport Economic Impacts 2003*, Halifax International Airport Authority, p. 33.
- Skelliy and Loy, INC., 2004, *Remediation Plan I-99 Construction Sections A12 and C12 Acid Rock Drainage*, PenDOT, p. 51.
- Sobek, A.A., Schuller, W.A., Freeman, J.R. and Smith, R.M., 1978, *Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils*, EPA-600/2-78-054, USEPA.
- Sobek, A.A., J.G. Skousen and S.E. Fisher, Jr., 2000. Chemical and Physical Properties of Overburdens and Minesoils. p.77-104 in: R.I. Barnhisel et al. (Eds.). *Reclamation of Drastically Disturbed Lands*. American Soc. Agron. Monograph No. 41, Madison WI.
- Surface Mine Drainage Task Force, 1979, *Suggested Guidelines for Method of Operation in Surface Mining of Areas With Potentially Acid-Producing Materials*, West Virginia Mining and Reclamation Association, Charleston, WV.
- USEPA, 1994, “Technical Document: Acid Mine Drainage Prediction”, EPA/530- R-94-036, p. 48.
- USEPA and Hardrock Mining, 2003, “A Source Book for Industry in the Northwest and Alaska”, *Appendix C; Characterization of Ore, Waste Rock, and Tailings*, C1-C17.



지 상 우

1995년 한양대학교 자원공학과 공학사
1997년 한양대학교 자원공학과 공학석사
2004년 한양대학교 지구환경시스템공학과 공학박사

현재 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 선임연구원
(E-mail; swji@kigam.re.kr)

정 영 옥

현재 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 책임연구원
(本學會誌 第42卷 第5号 參照)



백 승 한

1996년 한양대학교 자원공학과 공학사
1998년 한양대학교 자원공학과 공학석사
2004년 한양대학교 지구환경시스템공학과 공학박사

현재 광해방지사업단 수질개선팀 대리
(E-mail; shback@mireco.or.kr)



김 윤 상

1988년 한양대학교 자원공학과 공학사

현재 광해방지사업단 수질개선팀 팀장
(E-mail; yskim@mireco.or.kr)



고 주 인

2000년 세명대학교 자원환경공학과 공학사
2002년 한양대학교 지구환경시스템공학과 공학석사
2007년 한양대학교 지구환경시스템공학과 공학박사

현재 한양대학교 산업과학연구소 선임연구원
(E-mail; kojuin74@hanmail.net)



김 선 준

1980년 서울대학교 자원공학과 공학사
1982년 서울대학교 자원공학과 공학석사
1989년 퍼듀대학교 지구과학과 공학박사

현재 한양대학교 지구환경시스템공학과 부교수
(E-mail; nnsjkim@hanmail.net)

이 현 석

현재 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 연수연구원
(本學會誌 第43卷 第4号 參照)

임 길 재

현재 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 선임연구원
(本學會誌 第43卷 第4号 參照)