기술기사 1 | 한국지반공학회지 | Vol.30, No.4 | pp.18~25

산성배수 발생암석을 이용한 성토구조체 시공방법

송 영 석
한국지질자원연구원
지구환경연구본부
(yssong@kigam.re.kr)

김 재 곤
한국지질자원연구원
지구환경연구본부
(jgkim@kigam.re.kr)

전 철 민
한국지질자원연구원
지구환경연구본부
(femini@kigam.re.kr)

남 인 현
한국지질자원연구원
지구환경연구본부
(nih@kigam.re.kr)

1. 서 론

최근 새로운 도로건설, 기존도로확장, 대규모 택지 및 산업단지 조성 등으로 대규모 지반굴착이 빈번히 이루어지고 있다. 산성배수에 의한 피해는 휴/폐광산 지역의 대표적인 환경오염으로만 인식되어 왔으나, 건설현장에서도 산성배수에 의한 피해가 사회현안으로 대두되고 있다. 건설현장에서 발생되는 산성배수는 pH 6.0이하의 강산성이며 높은 농도의 중금속, 철, 알루미늄, 망간 등을 함유하고 있어 주변지역의 환경오염뿐만 아니라 구조물부식, 식생고사, 경관훼손, 암석풍화촉진, 사면안정성 저해 등 다양한 문제를 야기하고 있다(Kalin et al., 2006). 실제로 고속도로 및 국도 건설현장, 도수로 및 방수로 공사현장, 택지조성 공사현장에서 산성배수에 의한 민원과 공사중단이 발생하였다. 건설현장에서 야기된 산성배수에 의한 문제는 환경오염복원, 공사중단, 구조물 보호를 위한 대책수립 및 시행으로 막대한 추가 비용이 발생되고 있다(김재곤, 2007; 이진수 등, 2013).

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 대한 대책은 휴폐광산지역을 중심으로 검토되고 있으며 환경영향평가, 조사 및 설계 단계에서 산성배수에 대책수립은 형식적으로 이루어져왔다. 건설현장에서 산성배수의 발생은 공사시작 수개월 후에 발생되므로 조

사 · 설계단계에서 적절한 평가와 대책수립이 이루어지지 않은 현장에서는 산성배수에 의한 막대한 피해가 발생하고 있다.

본 원고에서는 먼저 건설현장에서 발생되는 산성배수의 발생 메커니즘과 산성배수에 의한 피해를 살펴보고자 한다. 그리고 산성배수 발생암석을 이용한 안정화된 성토공법을 제시하였다. 이를 통해 각종 건설현장에서 발생되고 있는 산성배수 발생암석에 의한 피해를 방지 혹은 저감시키고자 한다.

2. 산성배수의 발생 메커니즘

황화광물(sulfides)은 암석과 퇴적물에 흔히 산출되는 광물로서 퇴적물의 속성작용, 열수로부터 침전, 열수와 암석의 반응 등 다양한 지질작용에 의하여 생성된다. 생성조건에 따라 argentite(Ag_2S), chalcocite(CuS), galena(PbS), sphalerite[(Zn,Fe)S], chalcopyrite($CuFeS_2$), covellite(CuS), cinnabar(HgS), pyrite(FeS_2), 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, 지하수 수위 강하, 준설 등에 의하여 지표환경에 노출되면 용존산소와 반응하여 황산을 생성하고 산성배수를 발생시킨다. 가장 흔한 황화광물인 황철석의 산화과정은 다음과 같다(Stum and Morgan, 1995).

$$FeS_2 + 3.5O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2H^+ \quad (1)$$

$$Fe^{2+} + 0.25O_2 + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + 0.5H_2O \quad (2)$$

$$Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+ \quad (3)$$

$$FeS_2 + 14Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+ \quad (4)$$

황철석의 산화반응은 미생물의 작용과 순수 무기적인 반응의 복합과정이다. 황철석의 산화에 관여하는 미생물들은 *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus novellus*, *Thiobacillus acidophillus*, *Sulfurlobus acidocaldarious*, *Leptospirillum ferrooxidans* 등이 있다. 황철석의 산화반응 초기에는 반응 (1), (2), (3)이 우세하며 일정 농도 이상의 수소이온(H^+)이 생성되면 $Fe(OH)_3$ 생성반응[반응 (3)]이 발생하지 않고 Fe^{3+}는 황철석의 산화제로 작용하여 많은 양의 황산을 생성한다[반응 (4)]. Fe^{2+}의 Fe^{3+}로 산화반응에는 용존산소뿐만 아니라 미생물의 작용이 중요한 것으로 알려져 있다. 미생물작용에 의한 Fe^{2+}의 산화는 용존산소에 의한 반응보다 수만에서 수십만 배 높은 것으로 알려져 있다.

황화광물의 산화에 의하여 생성된 산성배수는 수소이온을 소모하면서 조암광물의 용해도를 증가시킨다.

$$NaAlSi_3O_8 + 4H^+ + 4H_2O \leftrightarrow Na^+ + Al^{3+} + 3H_4SiO_4 \quad (5)$$

따라서 산성배수는 황화광물로부터 용출된 Fe, 중금속, SO_4^{2-}뿐만 아니라 조암광물의 용해과정에서 용출된 다양한 종류의 이온을 함유한다. 일반적으로 산성배수는 높은 농도의 Fe, Al, Mn, 중금속, SO_4^{2-}를 함

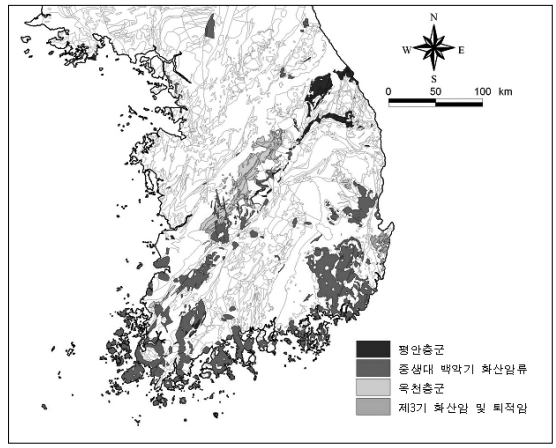

그림 1. 산성배수 발생암석의 분포(김재곤, 2007)

그림 2. 건설현장에서 발생된 산성배수에 의한 지표수 오염

유하는 특성을 가진다.

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

3. 산성배수에 의한 피해

건설현장에서 발생된 산성배수는 건설현장뿐만 아니라 주변지역의 토양, 지표수, 지하수를 산성화시키고 중금속, Fe, Al, Mn 등으로 오염시킨다. 토양, 지표수, 지하수의 오염은 질병유발, 생태계교란 등 다양한 환경문제를 유발하는 것으로 알려져 있다. 최근 절취사면에서 발생된 산성배수의 수질을 조사한 결과 H^+, Al, Fe, Mn 등이 주요 오염물질이며 일부사면에서 중금속이 환경기준을 상회하는 것으로 보고되고 있다(김재곤, 2007). 산성배수가 주변지역으로 유입되어 중화되면 다량의 중금속을 함유한 산화철, 알루미늄 화합물 등을 침전시킨다(그림 2). 특히 하상에 생성된 침전물은 저서생물의 서식공간을 파괴하고 어류의 아가미에 부착되어 질식시킨다.

암석은 부식성이 강한 산성배수에 노출되면 조암광물의 용해도가 증가하여 풍화가 촉진된다. 암석의 풍화는 산을 소모하는 과정으로 산성배수에 노출된 암석은 산성배수를 중화시키면서 용해가 가속화된다(김재곤, 2007).

$$CaAl_2Si_2O_8(s) + 2H+ \rightarrow Ca^{2+} + H_2O + Al_2Si_2O_5(OH)_4(s) \quad (6)$$

강우 혹은 유출 지하수에 의하여 생성된 산성배수는 건기에 용존 이온의 농도가 증가하면서 암석의 틈과 표면에 수용성 광물을 생성시킨다. 특히 암석의 틈에 생성된 광물은 쐐기로 작용하여 암석의 물리적 풍화를 촉진시킨다(그림 3). 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(그림 4).

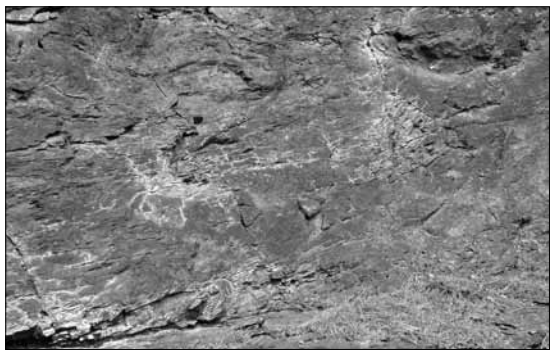

그림 3. 산성배수에 의한 수용성 광물 생성

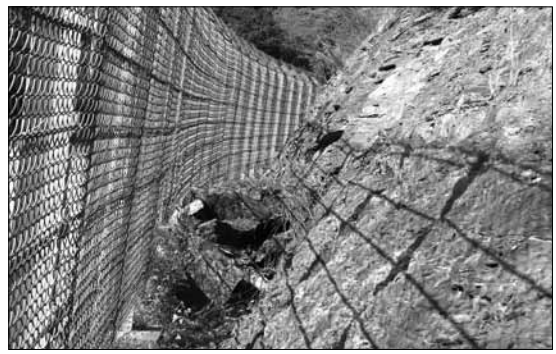

그림 4. 산성배수 발생사면의 붕괴

그림 5. 산성배수에 의한 숏크리트 부식

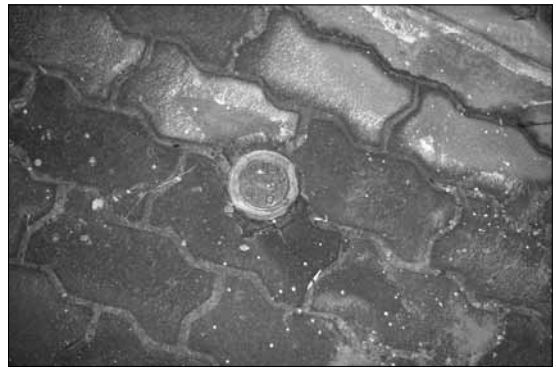

그림 6. 산성배수 발생 지반의 배관매설

그림 7. 산성배수에 의한 농작물 피해

그림 8. 산성배수 발생사면의 식생피복실패

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 노후화가 촉진된다(그림 5). 또한 산성배수를 발생시키는 암석 혹은 토사로 성토된 지역에서 상하수도관, 가스배관 등을 지하에 매설하는 경우 배관의 부식이 촉진되고 이송물질의 누출에 의한 안전사고가 우려된다(그림 6).

산성배수의 영향을 받은 토양은 산성화되고, 식물가용성 중금속, Fe, Mn 및 Al의 농도가 증가하게 된다. 증가된 수소이온, 중금속, Fe, Al, Mn 농도는 식물에 독성을 나타내게 된다. Al은 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. Mn은 식물의 광합성을 방해하여 성장부진 및 고사를 초래한다. 산성배수와 함께 토양에 유입된 Fe는 토양표면과 식물뿌리에 침전되어 영양분의 흡수와 호흡을 방해하고 투수율을 저감시킨다. 산성배수의 영향을 받은 토양은 산성화, 중금속, Mn 및 Al의 독성, 토양의 물리화학적 특성의 변화에 의하여 식생의 성장이 부진하고 고사하게 된다(Fig. 7). 산성배수가 발생되는 사면에서 산성배수에 대한 피해저감대책을 수립하지 않고 식생녹화를 실시하는 경우 실패하는 사례가 빈번히 발생한다(그림 8).

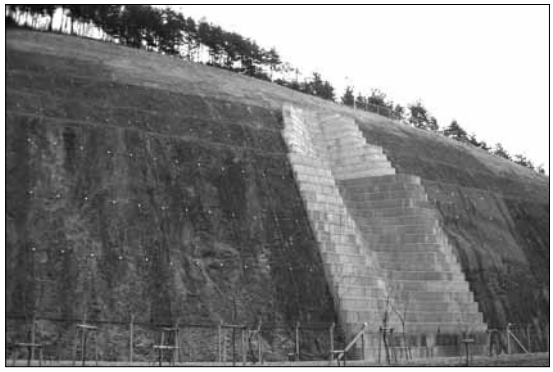

그림 9. 산성배수에 의한 경관훼손

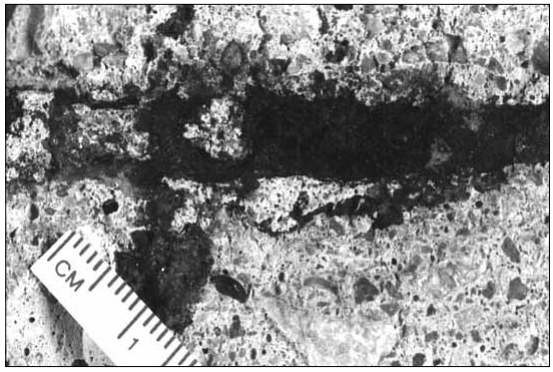

그림 10. 콘크리트 표면착색 및 노후화

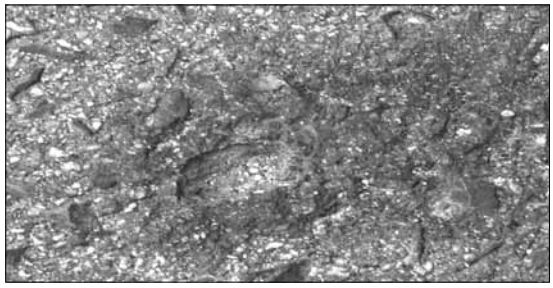

그림 11. 산성배수에 의한 아스콘 노후화

고농도의 Al과 Fe을 함유한 산성배수는 주변 매질과 반응하여 중화되면서 흰색의 알루미늄화합물과 붉은색의 수산화철, 산화철 등을 침전시킨다. 흰색 혹은 붉은색 침전물은 경관을 훼손한다(그림 9). 우리나라 골재품질평가는 강도, 마모성 등 물성측정을 통하여 이루어지고 있으며, 황화광물의 함유량과 산성배수 발생개연성에 대한 평가는 이루어지지 않고 있다. 황화광물의 악영향에 대한 적절한 평가없이 사용되는 골재에 의한 피해가 많이 보고되고 있다. 콘크리트에 함유된 황철석은 용존산소를 함유한 물과 반응하여 산화되면서 산성배수를 발생시키고 산화철, 수산화철, ettringite 등의 2차 광물을 생성한다. 콘크리트 내에서 황철석의 산화는 산성배수에 의한 부식과 2차 광물 생성에 의한 부피증가 및 강도저하로 콘크리트의 노후화가 촉진된다(그림 10). 아스콘에 함유된 황철석은 산화에 의하여 산성배수를 생성시키고 골재의 풍화를 촉진시킨다. 산성배수에 의한 아스콘의 분해와 골재의 급속한 풍화로 아스콘으로부터 골재의 이완과 탈착을 촉진시켜 아스콘의 노후화를 촉진한다(그림 11).

4. 산성배수 발생암석을 이용한 성토공법

4.1 성토공법의 유형별 적용방법

황철석을 함유한 굴착암석을 성토재로 사용할 경우 암석으로부터 발생한 산성배수에 의한 피해를 방지 혹은 저감시킬 수 있는 대책이 부재한 일반 암석 성토방법을 적용하면 주변지역 환경오염이 유발될 개연성이 매우 높다. 따라서 본 원고에서는 한국지질자원연구원(2014)에서 개발된 “산성배수 발생 암버럭을 이용한 성토구조체(특허등록번호 10-1350201)” 특허를 토대로 건설공사 시 산성배수 발생 암석의 안정화된 성토공법을 제안하고자 한다.

제안된 산성배수 발생암석의 성토공법은 평지 및 경사지에 모두 적용이 가능한 것이 특징이다. 산성배수 발생 억제를 위하여 코팅, 상부차수, 하부 모세관수 상승 차단, 사면 유기물 및 식생에 의한 용존산소 제거의 방법을 적용하고, 산성배수 중화를 위하여 중화제 혼합, 석회암 자갈배수로의 방법을 적용한다.

제안된 산성배수 발생암석의 성토공법은 성토대상

지형 및 산성배수 위해도에 따라 크게 4가지 유형을 적용한다. 표 1 및 그림 12는 제안된 성토공법의 유형별 적용방법을 제시한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 유형 Ⅰ 및 Ⅱ는 평지의 지형에 적용이 가능한 방법이고, 유형 Ⅲ 및 Ⅳ는 경사지의 지형에 적용이 가능한 방법이다.

4.2 주요기능

제안된 산성배수 발생암석의 성토공법의 주요기능을 살펴보면 모관수 상승 및 산성배수 지하수 유입방지, 산성배수 발생억제, 사면 식생피복 및 유출 산성배수 중화이다. 이에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

1) 모관수 상승 및 산성배수 지하수 유입방지

산성배수 암석은 지하수위 상부에 성토하고 지하수가 모세관현상에 의하여 암석에 도달하는 것을 방

표 1. 제안된 성토공법의 유형별 적용방법

유형	지형	산성배수 위해도 및 처리	사면 유형 및 처리
Ⅰ	평지	NAG pH<3.5 : 코팅+중화제 첨가	성토사면(식생피복)
Ⅱ	평지	3.5<NAG pH<4.5 : 중화제 첨가	성토사면(식생피복)
Ⅲ	경사지	NAG pH<3.5 : 코팅+중화제 첨가 3.5<NAG pH<4.5 : 중화제 첨가	압성토사면(식생피복)
Ⅳ	경사지		옹벽사면(석회암 자갈 중화 배수)

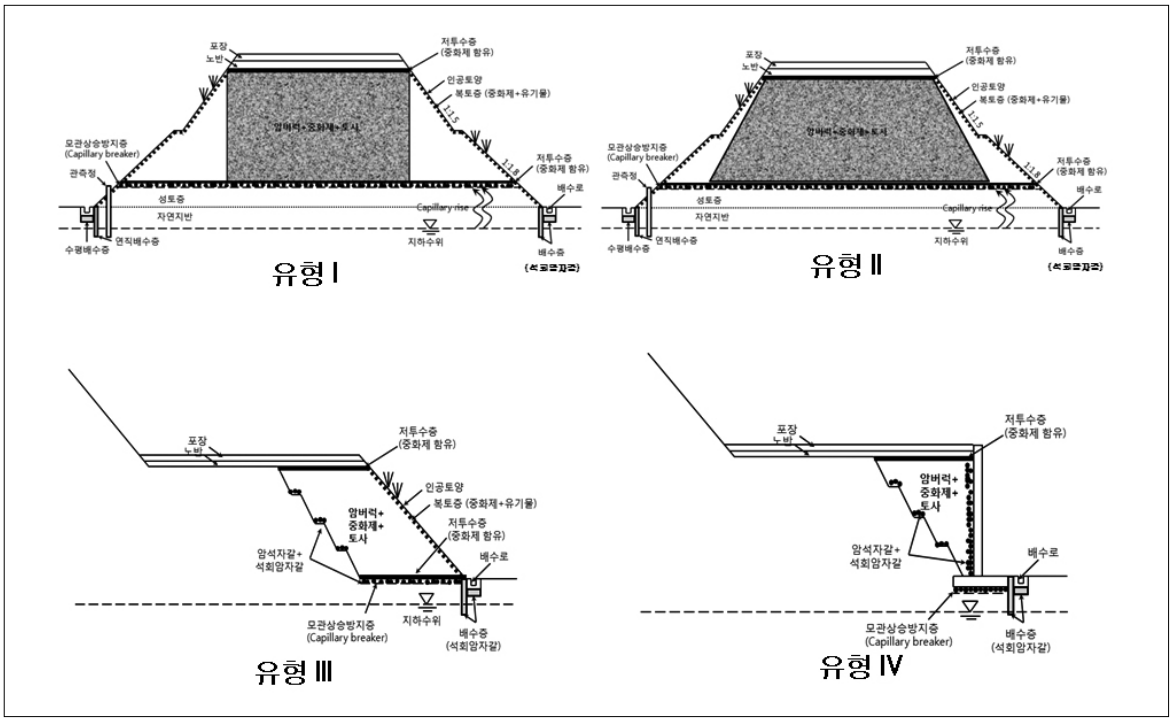

그림 12. 제안된 성토공법의 유형별 적용 단면도

지하기 위하여 석회암 자갈을 이용하여 30cm 두께의 capillary breaker를 설치한다. 또한 capillary breaker 상부에 석회석 분말 5%를 함유하고 있으며, 투수율 10^{-5}cm/sec 이하 층을 설치하면 상부에서 발생된 산성배수가 하부로 유입되어 지하를 오염시키는 것을 방지한다.

2) 산성배수 발생억제

산성배수의 발생을 방지하는 방법은 황화광물과 산화제의 접촉을 차단하거나 산화제를 제거하면 된다. 황철석의 산화제는 O_2와 Fe^{3+}로 알려져 있다. 황철석의 산화제인 O_2와 Fe^{3+}는 유기물과 알카리를 이용하여 제거할 수 있다. 또한 황철석 표면에 안정한 coating을 생성시키면 황철석과 산화제의 접촉이 차단되어 황철석의 산화가 방지된다. 황철석 표면에 인산염과 H_2O_2(0.01M KH_2PO_4 + 0.02M H_2O_2)를 함유한 용액을 살포하면 표면에 용해도 낮고 안정한 철인산염이 생성된다. 황철석 표면에 생성된 철인산염 coating은 산화제인 O_2 및 Fe^{3+}가 황철석과 반응을 차단하여 산성배수의 발생을 억제한다.

시공과정 중 이나 완료 후 성토층의 상부표면과 비탈면을 통하여 용존산소를 함유한 우수가 황철석을 함유한 암석으로 침투할 수 있다. 우수에 함유된 용존산소에 의하여 1차로 황철석이 산화되고 반응진행과정에서 생성된 Fe^{3+}가 황철석 산화제가 된다. Fe^{3+}에 알카리(OH^-)를 투입하면 $Fe(OH)_3$가 침전 · 제거 된다. 쉽게 취득할 수 있는 저가의 알카리 물질은 제강슬래그, 석회석, 석회고토, 레드머드 등이 있다. 우선 투입물질의 알카리 생성능력을 측정하고 암석의 순산발생능력(NAPP)에 해당하는 양을 투입하면 된다.

우수용존 O_2는 우수가 통과하는 매질에 유기물을 첨가하면 미생물에 의하여 유기물이 분해되고 분해되는 과정에서 용존산소가 소모되어 제거된다. 성토층을 도로로 활용할 경우 상부표층에 유기물을 투입하면 안정성을 저해할 가능성이 높다. 상부표층은 콘크리트 혹은 아스팔트로 포장하면 우수의 침투가 근원적으로 억제된다. 따라서 비탈면을 통하여 침투하는 우수로부터 용존산소를 제거하게 된다. 비탈면에 양질의 토양으로 성토 시에 토양에 적정량의 유기물을 혼합하는데, 유기물은 미생물에 의하여 분해되므로 주기적으로 투입해야하는 단점이 있다. 따라서 초기에 유기물과 산성배수에 의한 식생피해를 저감시킬 수 있는 토사를 비탈면에 성토하고 식생피복을 실시하면 주기적인 유기물 투입 없이 비탈면을 통하여 침투하는 용존산소를 효과적으로 제거할 수 있다. 비탈면의 식생피복은 비탈면의 안정성을 확보하고 지속적으로 유기물의 토양투입이 가능하다.

3) 사면식생피복

안정성 확보와 용존산소 제거를 목적으로 하는 비탈면의 식생피복은 산성배수에 의한 식생고사를 방지하고 하부로 침투하는 우수로부터 용존산소를 제거가 가능하여야 한다. 비탈면은 우기에 용존산소를 함유한 우수가 성토층 내부로 침투하고, 내부에서 발생한 산성배수가 건기에 모세관현상에 의하여 표면으로 상승하는 통로가 된다. 비탈면에 유기물과 중화제를 함유한 층을 조성하면 유기물에 의하여 하부로 침투하는 용존산소가 제거되고 중화제는 모세관현상에 의하여 이동하는 산성배수를 중화시키게 된다. 사면에 식생을 피복하면 식생에 의하여 유기물을 지속적으로 공급하는 효과를 기대할 수 있다.

4) 유출 산성배수 중화

옹벽 안쪽에 산성배수에 대한 중화능력이 높은 수직 석회암 자갈층을 설치하면 암버럭 성토층에서 발생된 산성배수가 석회암 자갈에 의하여 중화되고 배수된다. 성토 비탈면 끝단에 석회석을 이용한 연직배수층을 형성하여 성토 비탈면 표층부에서 발생하는 산성배수의 이동을 차단한다. 그리고 수평배수로 바닥 아래에 석회석 자갈을 이용한 수평배수층을 설치하여 석회석과 산성배수를 반응시켜 중화함으로써 배수로를 보호하는 역할을 한다.

5. 결론

토목건설 분야에서 산성배수는 생소한 분야로 원인 규명과 적절한 대책수립이 이루지지 않고 있어 막대한 경제적 피해가 발생되고 있다. 기존에 연구된 산성광산배수에 대한 이해와 대책기술을 바탕으로 건설현장의 산성배수에 대한 적절한 평가방법의 확립 및 산성배수 피해저감기술의 개발이 시급하다. 이에 본 원고에서는 산성배수 발생암석을 이용한 안정화된 성토공법을 제안하였다. 개발된 산성배수 발생암석의 성토공법은 평지 및 경사지에 모두 적용이 가능한 것이 특징이다. 산성배수 발생억제를 위하여 코팅, 상부차수, 하부 모세관수 상승 차단, 사면 유기물 및 식생에 의한 용존산소 제거의 방법을 적용하고, 산성배수 중화를 위하여 중화제 혼합, 석회암 자갈배수로의 방법을 적용한다. 개발된 산성배수 발생암석의 성토공법의 주요기능을 살펴보면 모관수 상승 및 산성배수 지하수 유입방지, 산성배수 발생억제, 사면 식생피복 및 유출 산성배수 중화이다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 "광산개발에 따른 지질환경재해 확산제어 기술 개발(No. 14-3212)"의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김재곤 (2007) 건설현장 산성배수의 발생현황 및 피해저감대책, 자원환경지질, 제40권 제5호, pp.651-660.
2. 이진수, 김재곤, 박정식, 전철민, 남인현 (2013) 고속도로 건설현장의 산성배수 발생개연성평가 및 피해저감대책: OO고속도로건설현장, 자원환경지질, 제46권 제5호, pp.411-424.
3. 한국지질자원연구원 (2014) 산성배수 발생 암 버럭을 이용한 성토구조체, 특허등록번호 10-1350201.
4. 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, Vol.28, pp.296-310.
5. 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.