

황철석 암버력을 이용한 고속도로 성토체의 산성배수 처리 사례 연구

공정식¹ · 김태형² · 송영석^{3*}

¹한국도로공사 기술심사처 부장, ²한국해양대학교 건설공학과 교수,

³한국지질자원연구원 지질환경연구본부 책임연구원

Case Study on the Treatment of Acid Rock Drainage from an Embankment with Pyrite Rocks

Jeong-Sik Gong¹ · Tae-Hyung Kim² · Young-Suk Song^{3*}

¹General Manager, Technical Review Office, Korea Express Cooperation

²Professor, Department of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University

³Principal Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Abstract

The treatment of acid rock drainage was reviewed and evaluated for the case of pyrite rocks distributed in a highway embankment. During the highway's construction, neutralization using alkaline water repellent was applied to the embankment section to prevent acid rock drainage. However, it still occurred long after the construction was completed owing to rain infiltration, and the acid rock drainage polluted the surrounding soils and streams. To solve this problem, treatment facilities such as SAPS (Successive Alkalinity Producing Systems) or ecological wetlands and sand filtration were installed. After the installation of the treatment facilities, the effluent and soils contaminated by acid rock drainage nearby the outlet of the facilities were analyzed and evaluated for a period of years. Measurements of the pH of the effluent and analysis of the heavy metal contamination of the soils confirmed that the neutralization treatment for acid rock drainage is being performed properly and that contamination of heavy metals in the acid rock drainage is also being stably controlled by the treatment facilities.

Keywords: pyrite rocks, acid rock drainage, highway construction, embankment materials, treatment facilities

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Young-Suk Song
E-mail: yssong@kigam.re.kr

Received: 6 October, 2021

Revised: 4 November, 2021

Accepted: 15 November, 2021

© 2021 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

본 연구에서는 고속도로 공사 시 주변에 분포하고 있는 황철석이 포함된 암버력을 성토체로 활용한 사례를 대상으로 산성배수 처리방안을 조사 및 평가하였다. 도로 시공 시 해당 성토구간에 알칼리 차수재를 이용한 중성화 공법을 적용하여 산성배수가 발생되지 않도록 하였다. 그러나 시공이 완료된 이후 장기적인 우수침투로 인하여 산성배수가 유출되어 주변의 토양과 하천을 오염시켰다. 이를 해결하기 위하여 SAPS 조 혹은 생태습지 및 모래여과시설과 같은 정화처리시설을 설치하였다. 정화처리시설 설치 후 유출부에서의 방류수와 주변 토양을 대상으로 산성배수로 인한 오염여부를 평가하였다. 유출부에서의 방류수에 대한 pH 측정 및 주변 토양의 중금속 오염 분석 결과 산성배수에 대한 중화처리가 적절하게 진행되고 있으며, 산성배수 내 존재하는 중금속에 대한 오염관리도 안정적으로 진행되고 있음을 확인할 수 있다.

주요어: 황철석 암버력, 산성배수, 고속도로 공사, 성토체, 정화시설

서론

황화광물(sulfides)은 암석과 퇴적물에 흔히 산출되는 광물로서 퇴적물의 속성작용, 열수로부터 침전, 열수와 암석의 반응 등 다양한 지질작용에 의하여 생성된다. 생성조건에 따라 다양한 황화광물이 나타날 수 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. 이러한 산성배수가 주변 하천이나 지하수로 유입될 경우 주변 환경 및 생태계에 악영향을 주게 된다. 특히 건설현장에서 발생한 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(Kim et al., 2014; Song et al., 2014).

우리나라에서 산성배수를 발생시킬 개연성이 높은 암석으로는 평안층군 탄층, 옥천층군 변성퇴적암, 중생대 화산암류, 제3기 퇴적암 및 화산암류, 광화대지역 암석 등이 있다. Fig. 1은 앞서 설명한 산성배수를 발생시킬 개연성이 높은 암석의 분포를 나타낸 것이다(Kim, 2007).

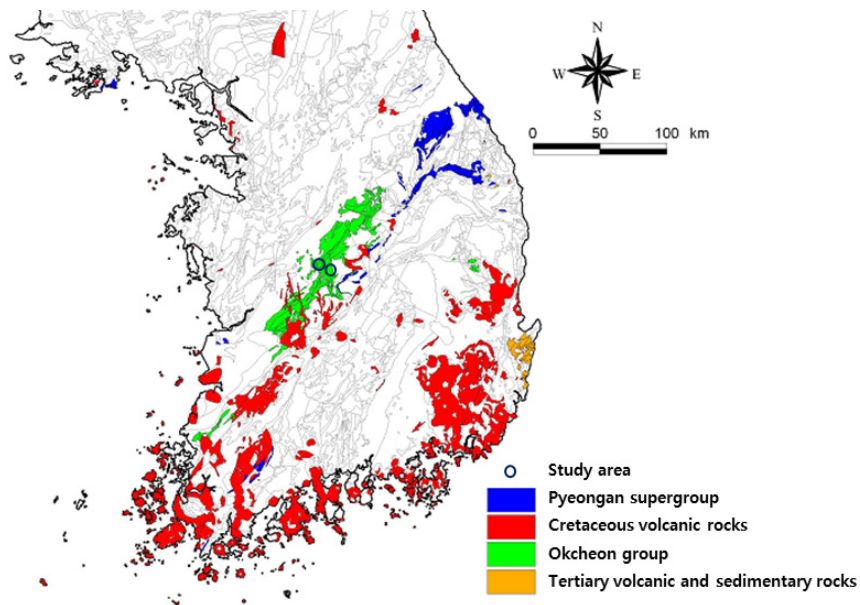


Fig. 1. Distribution of rocks with high probability of acid rock drainage (Kim, 2007).

일반적으로 황화광물의 산화에 의하여 생성된 산성배수는 수소이온을 소모하면서 조암광물의 용해도를 증가시킨다.



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 함유하는 특성을 가진다(Kim, 2007).

최근에는 도로 건설, 산업단지 건설, 택지조성 등에 의한 대규모 지반굴착으로 인한 황철석 시공사례도 꾸준히 증가함에

따라 산성배수에 의한 피해가 다수 발생하고 있어 과거 폐광산 지역에 국한된 산성배수에 의한 환경오염이 건설현장에서 의 환경오염 원인이 되고 있다. 이는 장기적인 관점에서 볼 때 주변지역의 환경오염에서 지하수 유입, 하천 생태계 교란, 중금속 성분의 축적 등으로 인한 사회문제로 발전할 개연성이 충분한 상황으로 황철석의 적정 시공방법과 산성배수 발생에 대한 적극적인 처리방안이 필요할 것으로 판단된다(Kim, 2007). 실제로 고속도로 및 국도 건설현장, 도수로 및 방수로 공사현장, 택지조성 공사현장에서 산성배수에 의한 민원과 공사 중단이 발생하였다. 건설현장에서 야기된 산성배수에 의한 문제는 환경오염복원, 공사 중단, 구조물 보호를 위한 대책수립 및 시행으로 막대한 추가 비용이 발생되고 있다(Kim, 2007; Lee et al., 2013).

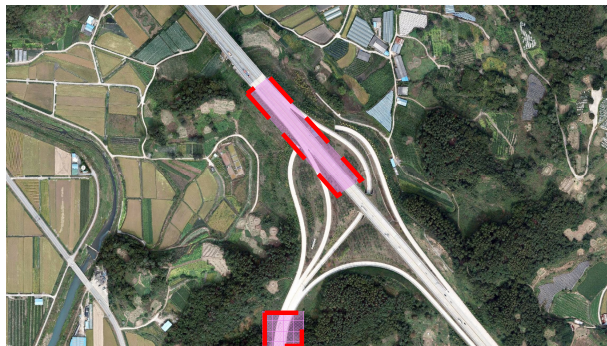
본 연구에서는 국내 고속도로 주변에서 발생한 산성배수 피해사례를 대상으로 이에 대한 처리방안을 조사 및 분석하고자 한다. 황철석 암버력을 성토재로 활용한 청주-상주선 고속도로의 일부 성토구간에서 발생되었던 산성배수 피해사례를 조사 및 분석하였다. 그리고 산성배수 피해로 인한 문제점을 해결하기 위하여 적용된 처리방안에 대한 평가를 수행하였다.

황철석 암버력을 활용한 고속도로 성토체 시공

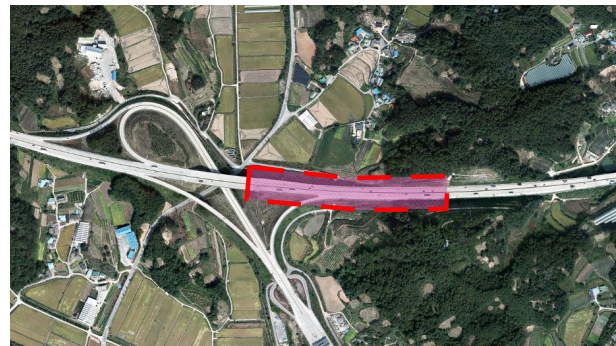
황철석 암버력 활용한 성토구간

고속국도 제30호선인 청주-상주선 고속도로는 청주-보은-상주를 연결하는 동서방향 도로로서 총연장 80.5 km이며 4차로 건설되었다. 2001년에 착공하여 총사업비 1조 4,148억원을 투입하여 2007년 11월에 개통하였다.

고속도로 공사 중 인근 독곰산에서 채취하여 활용된 황철석은 회이나들목의 성토재로 사용되었으며 해당노선의 보은터널에서 발생한 터널 암버력에서 발생한 황철석은 보은나들목의 성토재로 사용하였다. Fig. 2는 해당 고속도로 구간에서 황철석이 포함된 암버력으로 시공된 회이나들목과 보은나들목 성토구간을 나타낸 것이다.



(a) Heoin Interchange section



(b) Boeun Interchange section

Fig. 2. Embankment area constructed with pyrite rocks.

도로 성토구간의 산성배수 저감공법

해당구간에서 황철석으로부터 산성배수가 유출되는 것을 방지하기 위하여 성토구간을 대상으로 알칼리 차수제를 이용한 중성화 공법을 적용하였다. 즉 황철석의 산성과 석회석의 알칼리성을 혼합하여 중성의 유출수를 방류함으로써 황철석 암버력으로 시공된 성토구간에서의 산성배수로 인한 오염을 방지하고자 하였다.

고속도로 건설 당시 주변 국도의 건설현장에서 산성배수로 인한 문제점이 발생되어 해당노선의 경우에는 산성배수 저감대책을 수립하여 도로 성토구간을 시공하였다. 성토구간에 적용한 산성배수 중성화 공법은 Fig. 3과 같이 적용되었다.

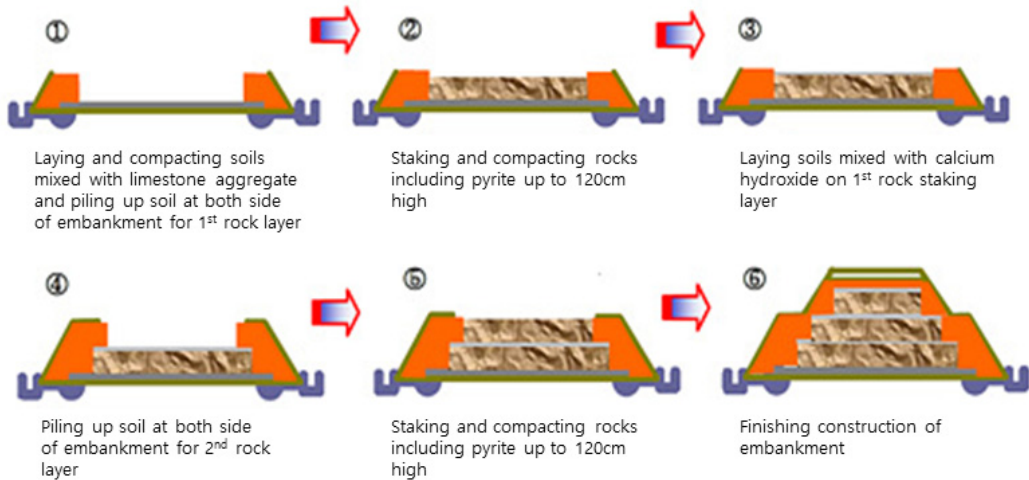


Fig. 3. Neutralization method using alkaline water repellent.

먼저 황철석이 포함된 암버력을 이용하여 성토 시 산성배수의 유출을 방지하기 위하여 알칼리 차수재인 소석회를 이용하여 황철석을 코팅한다. 그리고 석회석과 양질의 토사를 바닥면에 포설하고 성토체의 양측사면에 토사를 포설하고 다짐을 실시한다. 이후 황철석이 포함된 암버력을 약 120 cm 포설하고 다짐을 실시한다. 또한 양질의 토사와 소석회를 혼합한 재료를 이용하여 황철석 암버력 상부에 포설한다. 이와 같은 순서로 여러 층의 황철석이 포함된 암버력 성토체를 구성하고 층별로 시공한 황철석이 포함된 암버력을 양질의 토사를 이용하여 덮어서 완성한다. Fig. 4는 황철석이 포함된 암버력을 이용하여 고속도로의 성토체를 시공한 단면을 나타낸 것이다. 이와 같은 성토구조체를 시공하여 황철석이 포함된 암버력으로부터 산성배수가 유출되지 않도록 하였다.

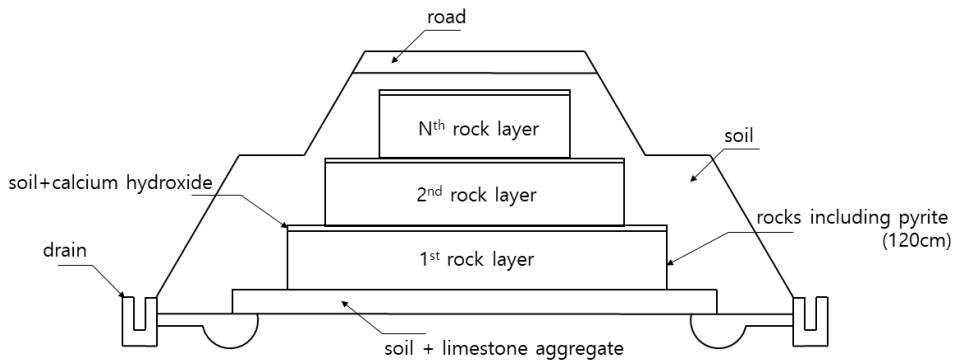
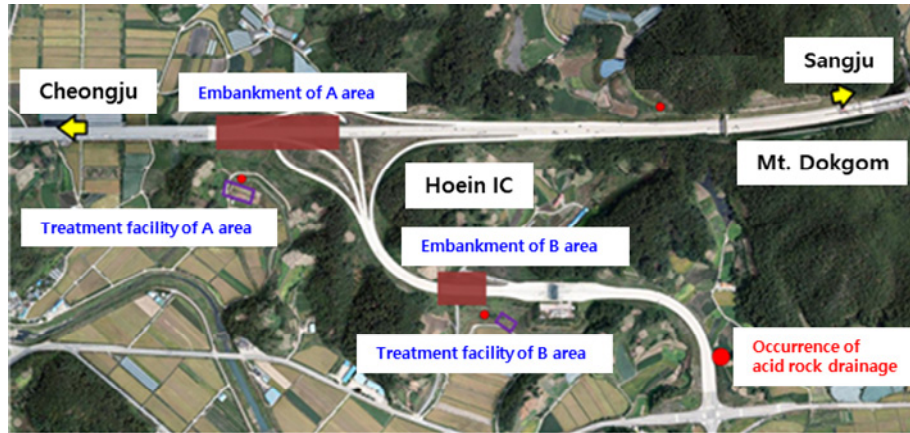


Fig. 4. Embankment to reduce the occurrence of acid rock drainage.

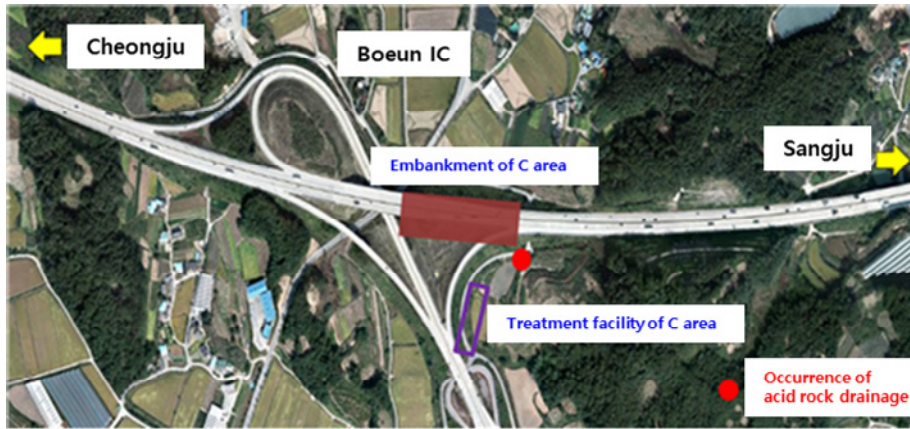
고속도로 시공 완료 후 산성배수 발생 및 처리방안

앞서 설명한 바와 같이 고속도로 시공 시 일부 구간에 대하여 황철석 암버력을 성토재로 활용하였으며, 산성배수 발생 저감을 위하여 알칼리 차수재를 이용한 중성화 공법을 적용하였다. 그러나 고속도로의 시공이 완료된 이후 장기적인 우수 침투로 인하여 해당 성토구간에서 산성배수가 유출되어 주변의 토양을 산성화시키고 산성배수에 포함된 중금속으로 인하여 주변의 하천과 지하수를 오염시켰다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 해당 성토구간에 정화시설을 각각 설치하였으며, 수질 분석을 통하여 산성배수에 대한 영향을 검토하였다. Fig. 5는 황철석 암버력을 이용한 성토구간의 정화시설 설치위치를 나타낸 것이다.



(a) Hoein Interchange section



(b) Boeun Interchange section

Fig. 5. Location of treatment facilities for acid rock drainage.

산성배수 처리기술은 크게 적극적 방법과 자연정화법으로 구분할 수 있다. 적극적 방법은 동력, 약품 및 인력 등이 지속적으로 투입되므로 운전비용이 많이 든다. 그러나 자연정화법은 인력, 동력, 약품을 지속적으로 투입하지 않고 유지관리를 최소화한 수처리 기술을 말한다. 자연정화법은 일반적으로 오염부하가 작은 산성배수 처리에 주로 적용된다. 대상 현장에 적용된 산성배수 처리기술은 자연정화법을 적용하고 있다.

A구간

Fig. 5a의 A구간에 대한 산성배수 처리를 위하여 자연정화처리시설 가운데 하나인 알칼리 생성조(Successive Alkalinity Producing System, SAPS)를 적용하였다. SAPS조에 대한 기본 구조는 약 3 m 깊이의 웅덩이를 조성하고 차수막 또는 콘크리트를 타설하여 조를 형성한다. 바닥에 유공관을 이용한 배수구를 설치하고 그 위로 석회석, 유기물을 적치한다. 이후 산성배수를 유도하여 유기물층 위로 약 1 m 정도 수심을 갖도록 한다. 이때 산성배수는 하향흐름 즉, 유기물과 석회석 층을 통과하면서 최종적으로 유공관을 통하여 방류된다.

A구간에 설치된 SAPS조는 수조 내 하부 0.5 m 두께로 석회석을 채우고, 석회석 상부에 유기물인 버섯퇴비를 0.5 m 두께로 쌓는다. 유기물 층의 상부 0.5 m 정도 수심을 유지하며 산성배수를 처리하도록 하였다. 유기물 층의 역할은 산성배수에 포함된 중금속인 철(Fe), 망간(Mn), 니켈(Ni), 아연(Zn)을 흡착하는 것이며, 석회석 층은 산성배수의 pH를 조정하여 중성화하기 위한 것이다. Fig. 6은 A구간에 설치된 SAPS조의 처리계통을 나타낸 것이다.

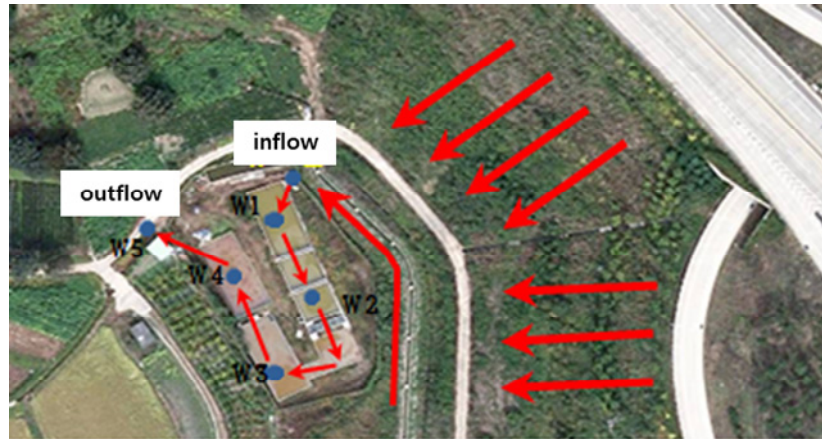


Fig. 6. The SAPS installed in area A.

B구간

Fig. 5a의 B구간에서도 산성배수 처리를 위하여 자연정화처리시설인 SAPS조를 적용하였다. 해당 구간의 경우 고속도로 시공직후에는 산성배수가 발생되지 않았으나 이후 성토체 하단에서 산성배수가 유출되어 소규모 SAPS조를 설치하였다. B구간에 설치된 SAPS조는 수조 내 바닥에 통수능 확보를 위한 자갈을 포설하고 자갈층 상부 0.5 m 두께의 석회석과 제강슬래그를 혼합하여 포설하였다. 석회석층 상부에는 폐목재인 피스모스를 0.25 m 두께로 쌓았다. 피스모스층의 역할은 산성배수에 포함된 중금속인 철(Fe), 망간(Mn), 니켈(Ni), 아연(Zn)을 흡착하는 것이며, 석회석과 제강슬래그의 혼합층은 산성배수의 pH를 조정하여 중성화하기 위한 것이다. Fig. 7은 B구간에 설치된 SAPS조의 처리계통을 나타낸 것이다.

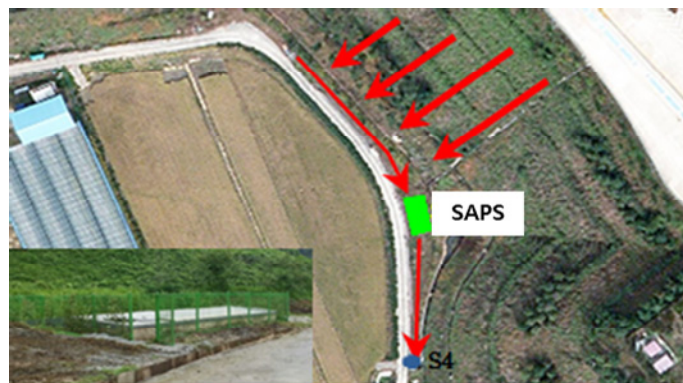


Fig. 7. The SAPS installed in area B.

C구간

Fig. 5b의 C구간에는 산성배수 처리를 위하여 자연정화처리시설인 생태습지와 모래여과시설을 설치하였다. 해당 구간의 경우에도 고속도로 시공직후에는 산성배수가 발생되지 않았으나 이후 장기적인 우수침투로 인하여 산성배수가 유출된 것으로 판단된다. 산성배수는 생태습지를 거쳐 모래여과시설로 유입되어 처리되도록 구성하였다. Fig. 8은 C구간에 설치된 생태습지와 모래여과시설을 나타낸 것이다.

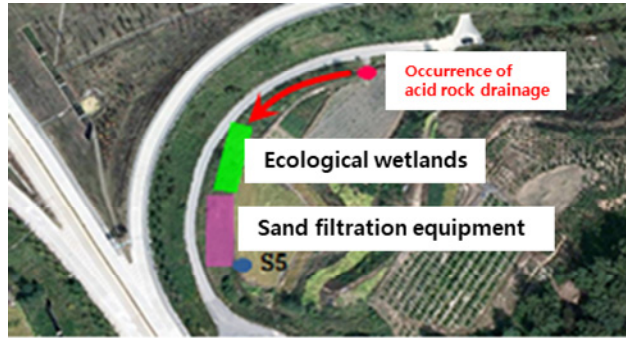


Fig. 8. Ecological wetlands and sand filtration equipment installed in area C.

구간별 산성배수 정화처리 결과 및 분석

A구간

A구간에 설치된 SAPS조를 대상으로 유입부터 유출에 따른 수질의 pH를 분석하였다. Table 1은 A구간의 SAPS조의 수질에 대한 pH분석 결과를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 유입부인 W1 지점의 pH는 3.56으로 강한 산성을 나타내고 있으므로 산성배수의 유출을 확인할 수 있다. W2지점의 pH는 7.31로서 정화시설에 의한 중성화가 진행되었음을 알 수 있으며, 최종 유출부인 W5 지점도 pH가 7.88로 산성배수의 중화처리가 적절하게 진행되었음을 확인할 수 있다.

Table 1. Measured pH for water collected from the treatment facility and its outlet in area A

| Point | W1 | W2 | W3 | W4 | W5 |
|-------|------|------|------|------|------|
| pH | 3.56 | 7.31 | 7.99 | 7.43 | 7.88 |

한편 정화 처리된 산성배수의 유출부 인근에서 토양을 채취하여 퇴적된 중금속의 영향을 파악하였다. 황철석에서 발생하는 산성배수 내 존재하는 중금속으로는 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 비소(As), 납(Pb), 아연(Zn), 크롬(Cr) 등이 포함되어 있으므로 해당 중금속을 대상으로 토양오염 분석을 실시하였다. Table 2는 A구간 정화처리시설 유출부에 위치하는 토양을 채취하여 토양오염 분석을 수행한 결과이다. 토양오염 정도를 나타내는 기준은 국내 토양환경보전법(Ministry of Environment, 2009)에서 제시한 기준 가운데 가장 청정한 지역의 기준인 토양오염 우려기준 1지역의 기준을 적용하였다. 표에서 보는 바와 같이 토양오염 분석결과 유출부 토양 내 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 비소(As), 납(Pb), 아연(Zn), 크롬(Cr)의 함유량은 토양오염 기준치 이내인 것으로 나타났다. 따라서 SAPS조의 정화시설로 인하여 유출부의 토양은 산성배수 내 존재하는 중금속 오염관리가 잘 되고 있음을 알 수 있다.

Table 2. Analysis of soil contamination near the outlet of the treatment facility in area A

| Element | Cr (mg/kg) | Cu (mg/kg) | Zn (mg/kg) | Cd (mg/kg) | Pb (mg/kg) | As (mg/kg) |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Measured value | 2.57 | 16.42 | 151.91 | 0.38 | 9.2 | 7.62 |
| Base line | 5 | 150 | 300 | 4 | 200 | 25 |

B구간

B구간에 설치된 SAPS조의 유출부 인근에서 채취된 방류수를 대상으로 pH를 시계열에 따라 약 3년간 조사하였다. Table 3은 B구간 정화시설 유출부 인근 방류수에 대한 pH 측정결과를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 설치 직후 방류수의 pH는 4.8로 산성을 나타내고 있었으나 이후 정화시설에 의해 중성화가 진행되어 산성배수의 중화처리가 적정하게 진행되고 있음을 알 수 있다.

Table 3. Measured pH for water collected from the outlet of the treatment facility in area B

| Time interval | The latter half of 2013 | The first half of 2014 | The latter half of 2014 | The first half of 2015 | The latter half of 2015 |
|---------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| pH | 4.8 | 7.0 | 6.5 | 7.8 | 7.2 |

한편 A구간과 동일하게 B구간에서도 정화 처리된 산성배수의 유출부 인근에서 토양을 채취하여 퇴적된 중금속의 영향을 파악하였다. Table 4는 B구간 정화처리시설 유출부 인근에 위치하는 토양을 채취하여 토양오염 분석을 수행한 결과이다. 표에서 보는 바와 같이 토양오염 분석결과 유출부 토양 내 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 비소(As), 납(Pb), 아연(Zn)의 함유량은 토양오염 기준치 이내인 것으로 나타났다. 따라서 B구간에 설치된 SAPS조의 정화시설로 인하여 유출부의 토양은 산성배수 내 존재하는 중금속 오염관리가 잘 되고 있음을 알 수 있다.

Table 4. Analysis of soil contamination near the outlet of the treatment facility in area B

| Element | Cr (mg/kg) | Cu (mg/kg) | Zn (mg/kg) | Cd (mg/kg) | Pb (mg/kg) | As (mg/kg) |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Measured value | - | 44.61 | 143.58 | 0.57 | 15.80 | 3.37 |
| Base line | 5 | 150 | 300 | 4 | 200 | 25 |

C구간

C구간에 설치된 생태습지 및 모래여과시설의 유출부 인근에서 채취된 방류수를 대상으로 pH를 시계열에 따라 약 3년간 조사하였다. Table 5는 C구간 정화시설 유출부 인근 방류수에 대한 pH 측정결과를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 설치 직후 방류수의 pH는 7.1로 중성화가 잘 진행되었음을 나타내며, 이후에도 지속적으로 산성배수의 중화처리가 적정하게 진행되고 있음을 알 수 있다.

Table 5. Measured pH for water collected from the outlet of the treatment facility in area C

| Time interval | The latter half of 2013 | The first half of 2014 | The latter half of 2014 | The first half of 2015 | The latter half of 2015 |
|---------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| pH | 7.1 | - | 7.4 | 7.5 | 7.3 |

C구간에서도 정화 처리된 산성배수의 유출부 인근에서 토양을 채취하여 퇴적된 중금속의 영향을 파악하였다. Table 6은 C구간 정화처리시설 유출부 인근에 위치하는 토양을 채취하여 토양오염 분석을 수행한 결과이다. 표에서 보는 바와 같이 토양오염 분석결과 유출부 토양 내 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 비소(As), 납(Pb), 아연(Zn)의 함유량은 토양오염 기준치 이내인 것으로 나타났다. 따라서 C구간에 설치된 생태습지 및 모래여과시설로 인하여 유출부의 토양은 산성배수 내 존재하는 중금속 오염관리가 잘 되고 있음을 알 수 있다.

Table 6. Analysis of soil contamination near the outlet of the treatment facility in area C

| Element | Cr (mg/kg) | Cu (mg/kg) | Zn (mg/kg) | Cd (mg/kg) | Pb (mg/kg) | As (mg/kg) |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Measured value | - | 9.13 | 67.85 | ND | 19.17 | 1.29 |
| Base line | 5 | 150 | 300 | 4 | 200 | 25 |

한편 Fig. 9는 모든 구간을 대상으로 정화 처리된 산성배수의 유출부 인근 토양에 퇴적된 중금속을 함께 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 토양 내 퇴적된 중금속들은 모두 토양오염 기준치 이내인 것으로 나타났다. 따라서 모든 구간에 설치된 정화시설은 그 기능을 적절히 수행하고 있음을 확인할 수 있다.

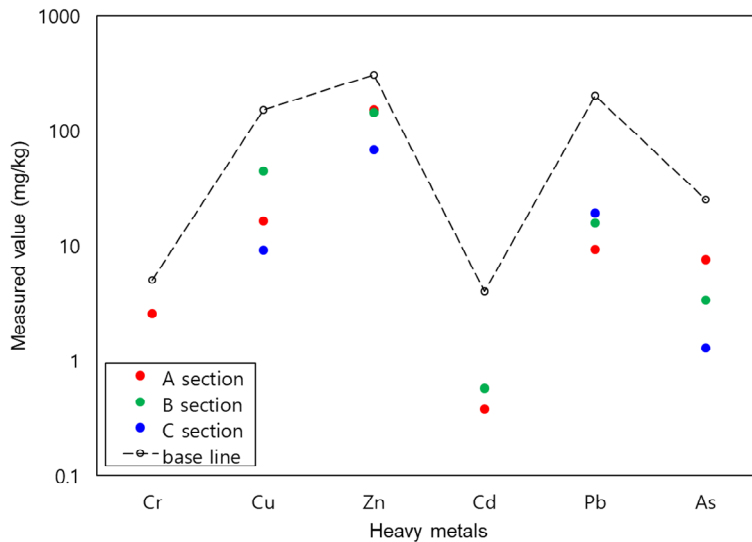


Fig. 9. Analysis result of soil contamination near the outlet of treatment facility in all areas.

결론

본 연구에서는 고속도로 주변에서 발생된 산성배수 피해사례를 대상으로 이에 대한 처리방안을 조사 및 분석하였다. 고속도로 시공 시 황철석 암버력을 성토재로 활용한 청주-상주선 고속도로의 일부 구간에서 산성배수로 인한 피해가 발생하여 주변의 토양과 하천을 오염시켰다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 해당 성토구간에 정화시설을 설치하였으며, 정화된 수질 및 인근 토양에 대한 분석을 수행하였다. 이를 토대로 정화시설에 대한 산성배수의 중화처리 및 중금속 오염 관리 기능을 평가하였으며, 이들 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 황철석 암버력을 도로 성토재로 활용 시 산성배수로 인한 피해가 발생되지 않도록 알칼리 차수제를 이용한 중성화 공법을 적용하여 성토구조체를 시공하였다. 황철석의 산성과 석회석의 알칼리성을 혼합하여 중성의 유출수를 방류함으로써 산성배수로 인한 오염을 방지하였다.
- (2) 고속도로의 시공이 완료된 이후 장기적인 우수침투로 인하여 해당 성토구간에서 산성배수가 유출되어 주변의 토양을 산성화시키고 산성배수에 포함된 중금속으로 인하여 주변의 하천이 오염되었다.
- (3) 지속적인 산성배수 유출에 대한 문제점을 해결하기 위하여 SAPS조 혹은 생태습지 및 모래여과시설과 같은 정화시설을 설치하였으며, 정화시설 유출부에서의 방류수와 유출부 인근 토양을 대상으로 각종 실험을 통하여 산성배수로 인한 오염여부를 평가하였다.
- (4) 산성배수에 대한 정화시설 유출부 인근 방류수에 대한 pH 측정결과 설치 직후 산성이었으나 시간이 지남에 따라 중성화가 진행되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 정화시설 유출부 인근에 위치하는 토양의 중금속 오염(카드뮴(Cd), 구리(Cu), 비소(As), 납(Pb), 아연(Zn))을 분석한 결과 토양오염 기준치 이내인 것으로 나타났다.
- (5) 해당구간에 설치된 정화시설의 경우 산성배수에 대한 중화처리가 적절하게 진행되고 있으며, 산성배수에 존재하는 중금속에 대한 오염관리도 안정적으로 진행되고 있음을 확인할 수 있다.

사사

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “실시간 도시지역 산사태 조기경보기술 및 지질환경 오염물질 위험관리기술 개발(21-3412-1)” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Kim, J.G., 2007, Acid drainage and damage reduction strategy in construction site: an introduction, *Economic and Environmental Geology*, 40(5), 651-660 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.G., Song, Y.S., Jeon, C.M., Nam, I.H., 2014, Assessment and stabilization embankment methods of acid rock drainage, *The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, 62(6), 36-41 (in Korean).
- Lee, J.S., Kim, J.G., Park, J.S., Jeon, C.M., Nam, I.H., 2013, Assessment and damage reduction strategy of acid rock drainage in highway construction site: ○○ highway construction site, *Economic and Environmental Geology*, 46(5), 411-424 (in Korean with English abstract).
- Ministry of Environment, 2009, Soil environment conservation act (in Korean).
- Song, Y.S., Kim, J.G., Jeon, C.M., Nam, I.H., 2014, Embankment construction method using acid rock drainage, *Geotechnical Engineering*, *Korean Geotechnical Society*, 30(4), 18-25 (in Korean).