

제 7 주 산성배수와 환경영향(I)

I. 산성배수의 전반적 고찰

<일러두기>

- 지형·지질 항목은 통상 지형의 변형이 중점 평가대상이지만, 눈에 보이지 않지만 영향의 발생시 그 피해가 매우 커지는 지질재해를 다루고자 하였다. 이러한 관점에서 산성배수는 대표적인 사례이므로 본 강의에서 다루었다.

1. 산성배수(ACID DRAINAGE)의 개요

● 산성배수의 의미

- 지층을 채광, 채굴 혹은 절개시 물이 지층에 접촉하여 흘러나올 때, 그 물의 총산도가 총알칼리도 보다 높은 것을 말함
- 특히 황철광을 함유한 탄층이나 광산이 많은 문제가 됨
- 총산도가 높을 경우 용해된 중금속(Cu, Zn, Ag, Pb, Au 등)의 함량이 높은 것이 특징임

● 산성광산배수

- 특히 광산과 관련된 산성배수는 Acid Mine Drainage(AMD)라고 하며, 산성광산수(acid mine water, AMW)라고도 한다.
- 황철석의 산화로 발생하는 AMD는 세계적으로 큰 문제를 일으키고 있다.
- AMW는 통상 pH=2-4이며, 중금속의 함량이 매우 높아서 수생생태계에 큰

영향을 미친다.

- 참고문헌: Ash et al., 1951, Barton 1978, Kelly 1988, Martin and Mills 1976, Nordstrom and Ball 1985)

● 특이산성토 혹은 산성황산염토양 (acid sulfate soils, ASS)

- 호수나 하구의 조간대에서 황철석의 주기적인 산화로 인해 발생한다.

- 참고문헌 : Van Breemen 1976, Pons et al. 1982

- 호주는 남부 해안선에서 산성토양이 많이 분포하여 수산업(특히 새우약식장)에 큰 영향을 미친다.

- 호주에서는 해안의 특이산성토를 처리하기 위한 특별프로그램을 운영하고 있다.

(Costal Acid Sulfate Soils Program, <http://www.erin.gov.au/coasts/programs/cassp/projects/index.html> 2001/10/27 출력)

- 참고문헌:

(1) 「An introduction to acid sulfate soils」, Natural Heritage Trust, Australia Seafood Industry Council. 2000.

(2) Acid Sulfate Soils. (<http://www.agric.nsw.gov.au/Arm/acidss>)

- 우리나라에서는 3기층에서 이러한 특이산성토가 발견되고, 농경지에서 가끔 문제가 발생하고 있다.

● 수계의 황산염 수지(balance)

- 하천에 유출되는 황산염의 공급원

- 지구 전체의 황의 유출입에서, 황철석의 풍화로 하천에 공급되는 양은 11% 정도이며, 채광으로 인해 그 비율은 증가 중임
- 하천의 황산염의 공급원 중 2/3는 증발암에서 공급되고(대부분 석고 CaSO_4)

$_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 나머지 1/3은 황철석의 풍화로 공급된다.

● 산성배수의 환경적 영향

- 산성배수로 인해 수계가 오염될 경우 나타나는 현상
 - 인접한 식생의 중금속 농축 혹은 폐사
 - 수생태계의 교란 혹은 파괴
 - 식물-동물 등의 먹이사슬로 농축/확대
 - 철수산화물의 침전으로 인한 경관 악화

● 산성배수의 이해의 필요성

- 국내에서 각종 사업으로 인해 자연적인 상태를 교란하는 경우가 많은데, 이때 산성배수가 나올 가능성이 매우 높다.
- 산성배수의 원인은 주로 황화광물 때문이며, 황철석이 가장 중요한 원인이다.
 - 자연계에서 철은 가장 흔한 원소이며, 지하환경에서는 환원조건 때문에 이 철은 황과 결합하여 황화철을 형성한다.
 - 이러한 황화철을 굴착하여 노출시키거나 광산에서 광미로 적치할 경우, 산소와물이 반응하여 산성배수를 일으킨다.

<남부지역의 산성토양 사례>

인위적 개발 생물 생존공간 파괴 부산·김해 황화광물 지층 공사로 노출 땀 작물 피해

부산·경남지역에서 도로공사나 토지개발 공사를 할 때 간혹 식물이 전혀 자라지 않는 지층을 볼 수 있다. 이는 강산성을 띠는 토양이기 때문이다. 이런 토양은 바닷물의 영향을 받은 층과 지질 시대 화산성 지열수에 의해 형성된 것이 많다. 남석광산의 황화광물(주로 황철석)을 함유한 지층이 풍화에 의해 산화한 경우도 많다.

황화광물이 땅 속에 묻혀 있을 때는 별다른 피해를 주지 않는다. 하지만 대기 중에 노출되면 서서히 산화되어 토양 뿐만 아니라 산성 배수로 심각한 환경문제를 일으킨다.

우리나라에서는 대규모 간척사업과 도로공사 등으로 피해가 발생한 예가 많다. 특히 김해와 밀양의 평야에서 산성 토양 문제로 인해 집단민원이 발생한 사례도 빈번했다. 산성토양이 노출되

어 공사후의 잔디와 조경수가 말라 죽는 일도 잦았다. 공단을 만들기 위해 절토하거나 매립·도로 공사 때 유출된 산성배수가 논으로 유입되어 농작물에 큰 피해를 입힌 예도 있다.

부산과 김해를 포함한 우리나라 동남부는 지질시대 화산활동이 활발했던 지역이라 화산 기원의 산성토양이 밀집된 곳이 많다. 특히 김해 지역은 도시의 팽창과 도로,항만,공항건설,공단조성 등 대형 토목 공사가 잇따르고 있다.부산에서 김해를 경유하여 밀양에 이르는 고속도로 주변에선 흔히 황갈색 토양이 발견된다. 암석 내의 황철석이 산화되어 산성 용액을 발생하고 있는 현상이다. 차후 사면의 안전문제를 일으킬 가능성이 높아 세심한 관찰이 필요한 장소이다.

부산의 회동수원지 상류에 위치한 동래와 임기 납석광산(사진)도 경계대상이다. 그곳에서 노출된 폐석과 암석들이 산화작용으로 산성배수를 형성,심각한 하천과 토양 오염원이 되고 있다.

현재의 땅은 오랜 지질시대 동안 자연적으로 균형을 유지해온 결과다. 인위적인 개발은 생물이 살아가는 공간을 파괴하는 요인이 되기도 한다. 동래, 김해·삼랑진으로 이어지는 황화광물 포함 지역. 그곳들에서 진행되는 각종 공사가 주변지역 토양을 오염시키는 일은 없어야 할 것이다. 자연을 깨끗하게 보존하려는 노력이 그 전제 조건임은 두말하면 잔소리다.

자료: [박맹언교수의 지질여행] 산성 암석과 토양 (부산일보 2007.01.31)

● 산성배수의 환경영향평가의 필요성

- 우리나라의 황화광물의 분포지가 많음

- 현재 국내는 황화광물이 상당량 포함되어 있는 지층이 많다.
- 황철석은 제3기층에도 포함되어 있는데, 해성퇴적환경에서 형성된 것이다.

※ 황산염(Sulfate, SO_4^{-2})이 퇴적되면 산소가 적어지면서 환원상태가 되면 황화물(S^-) 상태가 된다. 그러나, 이것이 다시 표에 노출되면 산화되면서 문제가 발생한다.

- 환경적 영향의 가능성이 크게 있음

- 각종 사업으로 인해 황화광물이 있는 지역이 노출될 경우, 산성배수로 인한 환경적 영향이 발생할 수 있다
- 그러나, 현재 산성배수로 인한 환경적 영향에 대한 조사, 예측, 평가, 저감대책등에 대한 자료가 부족한 편이다.

- 산성배수의 사례

- 청원-상주간 고속도로 공사구간의 터널구간은 산성배수가 발생하여 많은 민원이 제시되고 있다.

- 강릉탄전, 태백탄전, 영월탄전, 정선탄전, 평창탄전, 문경탄전은 산성배수가 우려되고, 삼척탄전은 심각한 수준임
- 황철석 함유 암석의 굴착시 영향
 - 황철석을 함유한 암석을 굴착할 경우, 터널은 부식방지를 위한 특수한 구조 설계가 필요하며, 절개면은 산성배수를 방지하기 위한 긴급처리를 해야 한다. 또한 버력은 산성배수가 발생하지 않도록 특수하게 처리하여야 한다.
 - 참고문헌: Byerly DW(1996) Handling acid-producing material during construction. Environmental Engineering Geosciences II, 49-57.

● 본 강의에서 다루는 범위

- 산성배수의 원인 분석에 중점을 둠
 - 산성배수에 대한 저감대책은 그동안 많은 연구가 있으나, 원인을 상세히 분석한 것은 매우 적음
- 원인분석 없는 처리계획은 비효율적이거나 근본적인 해결이 안될 수도 있다. 따라서, 본 장에서는 산성배수의 원인분석에 중점을 두고, 차후에 저감대책을 다루기로 함

2. 산성배수의 원인

● 산성배수는 어떻게 발생하는가 ?

- 황화광물이 함유된 지층에서 물이 흐를때 지구화학적 변화와 미생물의 반응으로 생긴다 <표 1>.
- 황화광물의 분해로 황산(H_2SO_4)이 만들어지지만, Fe성분이 포함되어 있을 경우 에는 지화학적 반응순환에 의해 산도가 급격히 높아진다.
- 또한 이 반응과정 중에 박테리아가 촉매로써 작용한다.

<표 1 > 황화광물의 종류와 화학조성

유형	광물명	화학조성
A ₂ X	argentite(휘은석)	Ag ₂ S
	chalcocite(회동석)	Cu ₂ S
A ₃ X ₂	bornite(반동석)	Cu ₅ FeS ₄
AX	galena(방연석)	PbS
	sphalerite(섬아연석)	(Zn,Fe)S
	chalcopyrite(황동석)	CuFeS ₂
	wurtzite	ZnS
	pyrrhotite(자황철석)	Fe _{1-x} S
	covellite	CuS
	cinnabar(진사)	HgS
AX ₂	pyrite(황철석)	FeS ₂
	marcasite(백동석)	FeS ₂
	arsenopyrite(유비철석)	FeAsS
	molybdenite(휘수연석)	MoS ₂

*자료: [1, p3], [2, p16], 유형분류: [6, p224] 한국명: [7, p587-593]

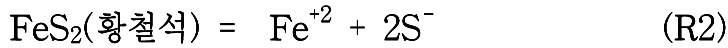
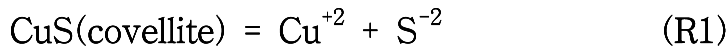
● 산성배수의 생성 과정[1]

○ 산성배수는 다음의 과정이 수반된다.

- 산화-환원 반응 및 산의 생성
- 2가 철의 순환적 반응으로 인한 반응속도의 증가
- 철수산화물의 침전으로 인한 수소이온의 증가

○ 산화-환원 반응과 산의 생성

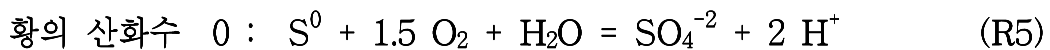
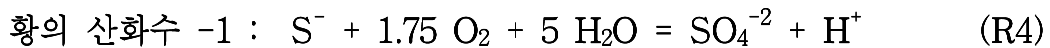
- 황화 광물의 용해과정
 - 모든 광물은 수용액에서 어느 정도 용해를 함으로써, 이온상태로 변할 수 있다. 즉,



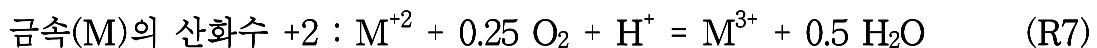
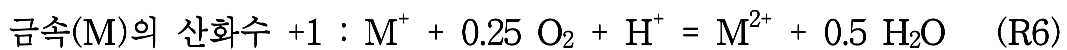
- 이들 용해된 이온들은 수용액 속에서 화학적 변화를 겪는데, 가장 흔한 것이 산화-환원 반응이다.
- 산화-환원 반응을 황과 금속이온의 관점에서 살펴보면 다음과 같다.

- 황 이온의 산화과정

- 용해된 이온들은 수용액에서 여러 가지 변화를 겪는데, 이중 용존산소가 있는 물이 있을 경우, 산소는 이들 이온과 활발히 반응을 할 수 있다.
- 황과 반응을 할 경우, 황의 산화수에 따라 구분하면 다음과 같다.



- 금속의 산화과정



- 황의 산화와 금속의 산화과정의 특징

- 황과 금속의 산화에는 산소의 소모가 진행된다.

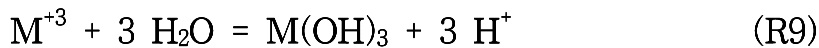
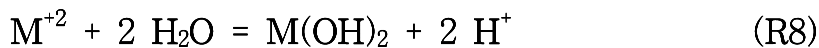
- 음이온이나 중성 황의 산화는 수소를 발생한다.
- 금속의 산화는 수소를 소모한다.

→ 이 과정만 일어나는 경우, 산도는 크게 높아지지 않는다. 그러나 용해성분이 많아진 수용액에서는 침전반응이 발생할 수 있으므로, 이에 따른 현상으로 산성배수가 크게 발생한다.

○ 침전반응

- 금속이온의 침전

- 수용액에서 과포화되었거나, 다른 요인에 의하여 용해된 성분은 침전이 가능하다.
- 이 경우 금속광물의 침전은 산도를 높인다.



- 산화와 침전반응의 진행

- 결국 금속원소의 산화와 철수산광물의 침전이 동시에 진행되면 (R6)~(R9)까지의 반응은 다음과 같이 표현될 수 있다.



→ 요약하면,

- 금속광물의 용해, 금속원소의 산화, 수산화금속광물의 침전 등은 수용액의 산도를 높인다.
- 그러나, 산도가 매우 높아져서(pH<2 이하), 수산화금속광물의 안정영역이

줄어들 경우에는 수산화광물도 침전이 안될 수도 있다[3, p183].

- 이 경우 용해된 금속이온을 함유한 물이 하류로 흘러가서 산도가 낮아지는 곳에서 침전될 수 있다.

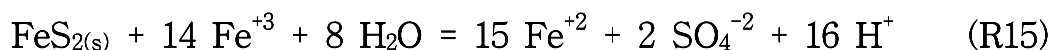
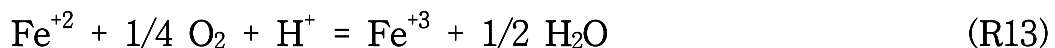
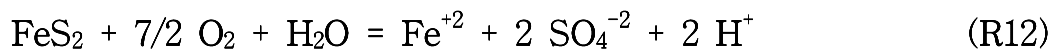
○ 황철광의 산화

- 자연계에서 산성배수의 주요 요인은 황철광에 의한 것이 주요 요인임 [4, p540-542]
- 자연계에서 황철광은 황철석(pyrite)과 백철석(marcasite) 두 가지로 구분 (표 2).

<표 2> 황철광의 종류와 특징

광물명	화학생분	결정계	광물의 안정성	자연계 산출량	산성배수 영향
황철석	FeS ₂	등축정계	안정	광범위함	큼
백철석	FeS ₂	사방정계	불안정	부분적임	적음

- 황철석의 산화/환원과 침전 반응은 비교적 그 잘 알려져 있음 [4, p541]
- 통상 FeS₂는 탄층에서 환원상태로 있는 황철석의 미세한 집합체로 간주한다.
- 탄층에서 채광 등으로 황철석이 노출되어 산소와 물과 접할 경우 다음과 같은 반응이 진행된다.



- 위 반응의 특징

• (R14) : 수산화철광물의 침전은 산도를 더욱 높인다(R14).

• (R15) : Fe^{+3} 은 그 자체가 황철석의 존재로 인해 환원될 수 있다.

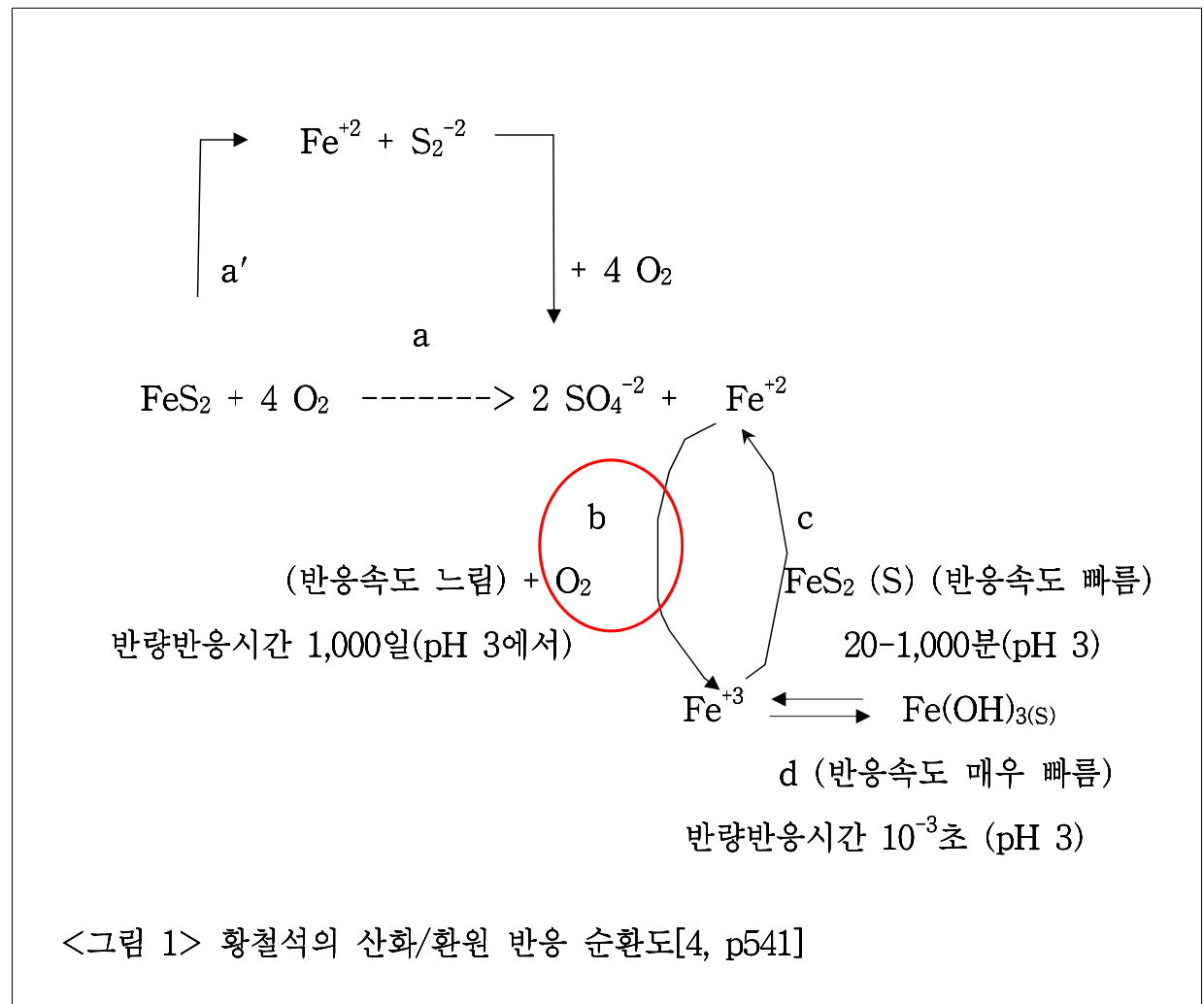
 : 따라서 산도를 더욱 높이는 결과를 초래한다.

 : 이 반응은 매우 빨라서 Fe^{+2} 를 만들고, Fe^{+2} 는 (R13)을 반복한다.

→따라서, 한번 황철석이 산화되면, 산도가 높아질 뿐만 아니라 황철석의 용해가 가속되어 산성배수는 크게 발생한다.

→ 이러한 이유로 인하여 작은 양의 황철석이 존재하더라도 우리는 산성배수의 영향을 주의하여 살펴보아야 한다.

- 이들 반응의 순환과정은 다음과 같다(그림 1).



- 침전된 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 의 역할
 - 용해된 Fe^{+3} 의 조절자 역할을 한다. 즉 b의 반응이 멈출 경우, 침전된 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 가 용해되어 Fe^{+3} 를 다시 공급하게 되므로 그 반응은 계속된다.
- 반응속도가 느린 과정(b)이 있는데 왜 산성배수가 발생하는가 ?
 - 자연계에서 b 반응과정 때문에 위 반응순환체계에서 반응속도를 규제하는 요인이 된다. 즉 산소의 공급여부가 가장 중요한 변수이다. 이 경우 산성배수는 크게 문제가 될 수 없을 것이다.
 - 따라서, 교란으로 인한 산소공급만 줄어든다면 산성배수는 줄일 수 있다.

- 그러나 현실적으로는 아주 작은 황철석이 존재하고 뚜렷한 산화환경이 아닌 것 같은데도 산성배수 문제가 발생하고 있다.

→ 이의 이유를 박테리아 등의 영향으로 보고 있다.

○ 황철석 반응의 특징

(1) Fe^{+3} 는 황철석 덩어리와 공존할 수 없다. 즉 Fe^{+3} 는 거의 순간적으로 황철석에 의하여 환원되어 Fe^{+2} 로 변한다.

(2) 황철석의 전반적인 용해율은 황철석의 표면구조와는 무관하다.

(3) 반응 b를 촉진하는 것은 미생물의 작용으로 보고 있다.

(MP Silverman and DG Lundgren, Journal of Bacteriology, 77, 642, 1959 [4, p542])

- 황철석의 산화에서 미생물의 역할[4, p542]

• +2가 철이온의 산화 반응을 촉진하는데 박테리아가 큰 영향을 미친다.

• 실제로 철박테리아인 *Thiobacillus ferrooxidans*는 반응에 참여한다.

→원자현미경으로 이들 박테리아에 의한 반응을 관찰할 수 있다.

• 구리(copper)광물이나 우라늄(uranium)광물도 박테리아에 의한 용해도 증가가 관찰되는데 이때도 대체로 황철석이 간여되어 있는 경우가 많다.

→지구의 지표면에서 발생하는 모든 변화는 생물이 간여하는 경우가 많다. 황화광물과 미생물의 반응은 별도의 강의에서 주로 다루기로 한다.

※ 산성배수지역에서 저감방안을 고려하려면, 미생물에 의한 반응과정을 철저히 파악하여야 한다.

3. 산성배수에 대한 영향평가 및 저감방안 마련

- 각종 개발사업시에는 산성영향을 예측하고 적절한 저감방안을 고려한다.

○ 산성배수의 예측 방법

- (1) 사업지구의 지질도를 확인한다.
- (2) 각종 자료를 활용하여 사업지구의 광산현황과 등록광종 등을 파악한다.
- (3) 금속광산, 탄층이나 제3기층이 있을 경우, 사업지역을 면밀히 조사한다.
- (4) 절개지역(터널지역, 절토지역)의 범위와 정도를 예측한다
- (5) 기존의 사례를 조사한다.

○ 산성배수 예측시 고려사항

- 터널지역

- 터널내부에서 굴착으로 발생하는 산성배수의 정도를 산정하여 평가한다.
- 버력 발생량을 산정하여, 버력에서 유출되는 산성배수를 평가한다.

- 절토지역

- 절개지의 노출정도에 따른 산성배수의 정도를 고려한다.
- 절토된 토사가 성토/사토되는 지역에 대한 영향을 고려한다.

- 공급물질-오염물질의 전달경로-수용체를 구분하여 현황을 파악한다.

○ 산성배수의 평가방법

- (1) 절토예정지역의 수 개소에서 시료를 채취하여 산도 발생 잠재치 (acid generating potential)를 산정한다.
- (2) 기존 산성배수 발생지역은 현황을 정확히 조사한다.

- 황화광물의 종류를 정확히 파악한다.
- 특히 박테리아의 종류, H₂S의 발생 여부, 다른 생물상(특히 조류 등) 등을 파악한다.

(3) 여러 가지 조건하에서 시료를 이용하여 금속이온의 추출율을 구한다.

(4) 방출되는 수계의 수리지화학적 분석치를 이용하여 수질예측을 실시한다.

○ 저감대책 마련

- 원인-오염물질의 전달경로-수용체 중 어느곳을 차단해야 할지 고려하여 저감대책을 수립한다.

○ 광산배수 처리 및 조치의 사례

- 일반적인 오염토양의 처리기술은 잘 알려져 있으므로 여기에서는 광산배수에 적용된 처리기술을 알아본다.
- 산성광산배수 지역에서 처리공법/기술은 <표 3>과 <표 4>를 참조 [2, p44, p63-64]

<표 3> 산성배수 처리 방법의 비교

처리방법	장점	단점	비고
물리화학적 처리	· 처리효율 높음	· 지속적인 운전비 소요	· 가행광산에 적용 중
소택지		· 처리시스템 수명 불확실	· 자연정화 시스템으로 폐광산 배수 처리에 적용 중
Anoxic Limestone Drain(ALD)	· 유지비 저렴	· 대규모 배수처리에 한계	
그라우팅		· 누수 가능성	

<표 4> 산성배수광산의 처리공정의 비교

정화방법	특징
Limestone Drains	-석회석을 산성배수와 접촉시켜 알칼리수로 변환하여 처리 · Anoxic Limestone Drains(ALD) · Oxidic Limestone Drains(OLD)
SAPS(Successive Alkalinity Producing Systems)	-pH가 낮고, Fe^{+3} 의 농도가 높을 경우 적용 · limestone drains로 처리 곤란시 적용
Wetland Construction	-토양, 나무 등의 흡착, 여과, 흡수, 황산염 환원 등을 이용하여 제거 · Aerobic/Anaerobic 두가지 존재
Diversion Well	-석회석 표면에 금속수산화물이 침전하는 것을 방지하여 지속반응 유지

○ 터널지역의 버력처리에 대한 연구사례

- 「청원-상주간 고속도로 제4공구 환경친화성 검토(황철석 버력 및 산성배수 처리 중심)」, 한국건설기술연구원. 금강종합건설(주), 한국도로공사, 2002.

■ 참고문헌

- 본문에서 [1, p345]의 앞의 1은 참고문헌 번호이며, p345는 그 참고문헌 내에서 해당하는 면수를 가리킨다.

- [1] 유재영, 「광산배수의 산성화 및 그에 따른 환경문제」
(<http://www.koreath.net/lecture/enviro/amdintro/amdintro00.htm>
00/12/08 출력)
- [2] 「청원-상주간 고속도로 제4공구 환경친화성 검토(황철석 버력 및
산성배수 처리 중심)」, 한국건설기술연구원 · 금강종합건설(주),
한국도로공사, 2002.
- [3] Drever JI (1997) 「The Geochemistry of Natural Waters. Surface
and Groundwater Environments」 (3rd). Prentice-Hall.
- [4] Stumm and Morgan (1970) 「Aquatic Chemistry」 .
Wiley-Interscience
- [5] Nordstrom and Southdam (1997) Geomicrobiology of sulfide mineral
oxidation. In: Geomicrobiology: Interactions between Microbes and
Minerals. JF Banfield and KH Nealson (eds), Reviews in
Mineralogy 35. Mineralogical Society of America.
- [6] Mason, B and Berry LG (1968) 「Elements of Mineralogy」 .
Freeman.
- [7] 김수진 (1996) 「광물과학」 . 우성.
- [8] 최용수 외 (1999) 「폐광산복원기술」, 과학기술부. (이 책의 50쪽에는
국내 폐광산연구목록이 수록되어 있음)

<끝>.