

WHAT IS  
SICAL FEATURES  
THE GROUND?

# 지형지질환경영향평가

## 05. 산성배수와 환경영향



ENVIRONMENTAL  
PROBLEM

## 1. 발생원인

### 1) 산성배수의 개요

광물을 채취하기 위하여 지하암반을 굴착하게 되며 암반 내에 포함된 황화광물이 산소 및 물에 노출되어 산화작용에 의하여 주변 자연수의 pH를 낮추게 된다. 이를 산성배수라 한다. 황화광물 중 산성배수에 가장 크게 관여하는 광물이 황철석이며 물, 공기, 박테리아와의 반응을 통하여 산화작용을 일으킨다[그림 산성배수 발생에 관여하는 요인].

특히 광산에서 발생하는 산성배수를 산성광산배수(Acid mine drainage, AMD)<sup>1)</sup>라고 하며 갱내에서 발생하는 지하수 또는 폐석 더미와 반응한 우수 등에 의하여 발생한다. 산성광산배수는 통상 pH=2~4로 매우 낮으며 중금속의 함량이 매우 높아서 수생태계에 큰 영향을 미친다.

그밖에 산성배수는 특이산성토 혹은 산성황산염토양(Acid Sulfate Soil, ASS)<sup>2)</sup>에서도 발생한다. 호수나 하구의 조간대에서 황철석의 주기적인 산화로 인하여 발생하고 있다(Van Breemen 1976; Pons et al. 1982). 호주는 남부 해안선에서 산성토양이 많이 분포하여 수산업(새우양식장)에 큰 영향을 미치고 있다. 호주에서는 해안의 특이산성토를 처리하기 위한 특별프로그램을 운영하고 있다<sup>3)</sup>. 우리나라에서는 제3기층에서 이러한 특이산성토가 발견되고 농경지에서 가끔 문제가 발생하고 있다<sup>4)</sup>.

광산에서 배출되는 물 중 일반적으로 규석, 장석, 고령토, 석회석 등과 같은 비금속광물은 중금속이나 위해성분이 포함되어 있지 않다. 산성배수는 대부분 황화광물이 함유된 금속광산과 석탄광산 지층의 채광에 의한 것으로 산소 및 물과 접촉하면서 산화반응을 일으켜 발생되는 것으로 알려져 있다. 하지만 비금속 광물 중 납석의 경우에는 중금속이 일반적인 토양보다 많이 포함된 경우도 있어 오염된 침출수를 발생시키는 것으로 보고된 바 있다.

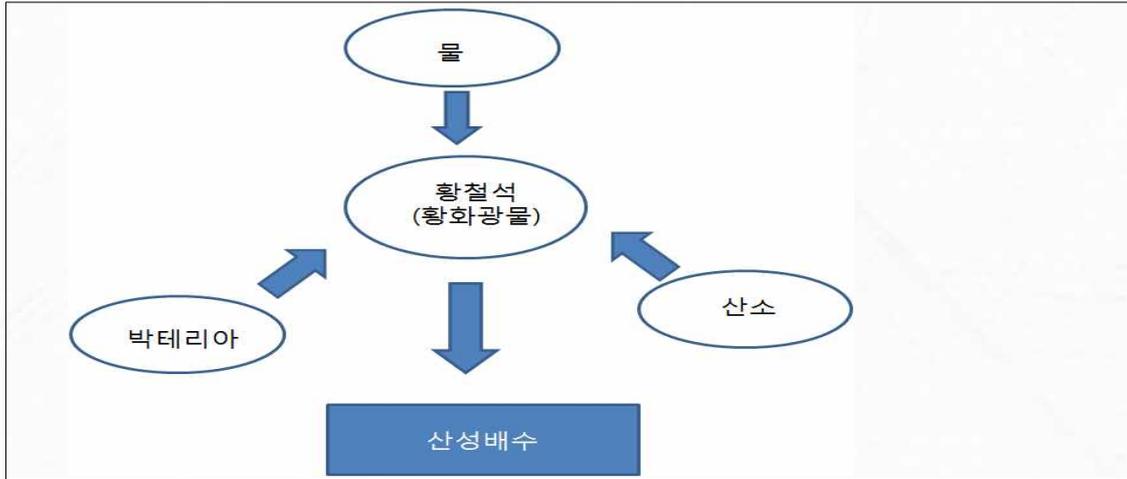
1) 규정(1986)에 의하면 산성광산배수는 pH가 6.0 미만이고 총산도가 총알칼리도를 초과하는 물로서 노천광이 가행되었던 지역, 가중중이거나 휴광 또는 폐광된 광산에서 유출되는 물이다.

2) <http://www.agric.nsw.gov.au/Arm/acidss>

3) Coastal Acid Sulfate Soils Program, <http://www.erin.gov.au/coasts/programs/cassp/projects/index.html>

4) 남부지역의 산성토양 사례(부산일보 기사) 참조

[그림 5-1] 산성배수 발생에 관여하는 요인



자료 : 석탄산업합리화사업단(1995) 폐광에 따른 광산지역 환경개선 연구보고서(폐수, 폐석)

<남부지역의 산성토양 사례>

**인위적 개발 생물 생존공간 파괴  
부산-김해 황화광물 지층 공사로 노출 댐 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 지질시대 화산성 지열수에 의해 형성된 것이 많다. 납석광산의 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 노출되어 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 현장이다. 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.

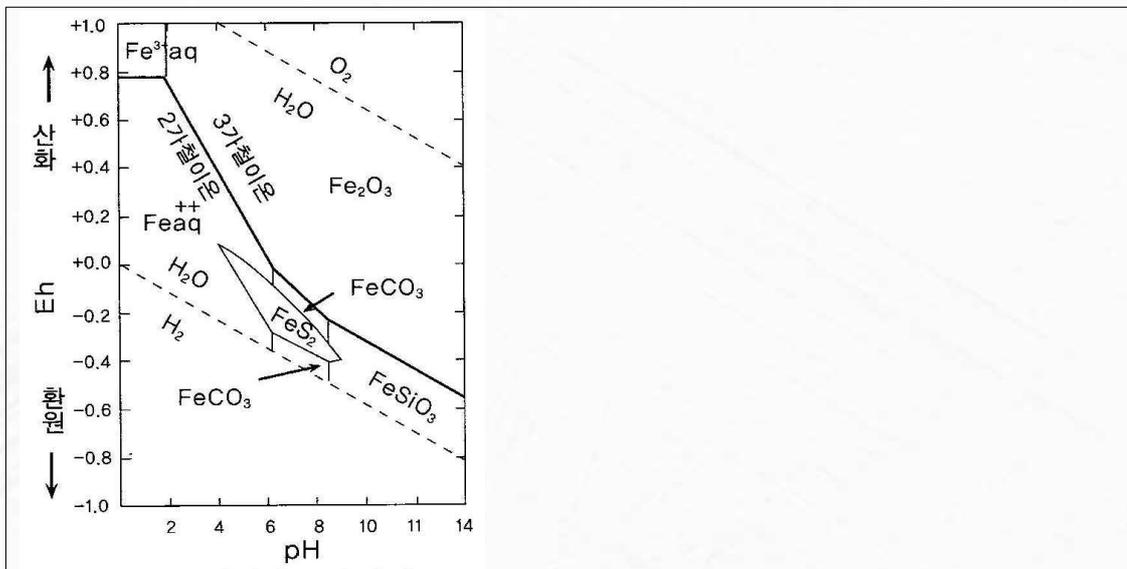
현재의 땅은 오랜 지질시대 동안 자연적으로 균형을 유지해온 결과다. 인위적인 개발은 생물이 살아가는 공간을 파괴하는 요인이 되기도 한다. 동래, 김해-삼랑진으로 이어지는 황화광물 포함지역. 그곳들에서 진행되는 각종 공사가 주변지역 토양을 오염시키는 일은 없어야 할 것이다. 자연을 깨끗하게 보존하려는 노력이 그 전제 조건임은 두말하면 잔소리다.

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

## 2) 황화광물의 풍화작용

황화광물은 생성 당시 환원환경에서 안정된 광물이었으므로 지표에서는 공기 중 산소에 노출되면 산화작용에 의해 풍화작용을 받는다. 자연계에서 철은 가장 흔한 원소이며, 지하환경에서는 환원조건 때문에 이 철은 황과 결합하여 황화철을 형성한다. 산성수를 만드는 황화광물 중 대표적인 것이 황화철( $\text{FeS}_2$ )이며 백철석과 황철석의 형태로 산출된다. 이 두 광물은 동질이상<sup>5)</sup>이다. 자연계에는 황철석이 백철석보다 더 많이 존재하므로 산성수의 생성은 대부분 황철석의 분해에 의해 발생한다. 황철석은 대기에 노출된 뒤에는 단지 수년 내에 빨리 풍화되어 산화된다. 대부분의 황철석은 석탄을 포함하는 지층에서 많이 산출된다. 예를 들면, 흑색 세일에는 상당량의 황철석이 함유되어 있다. 이러한 황철석은 채탄작용에 의한 탄층제거 시 대기권, 수권, 생물권에 노출되기 쉽다. [그림 철화합물의 안정도]은 산도(pH)와 산화환원지수(Eh)에 의한 철화합물의 안정도이다. 가장 일반적이고 중요한 성분인 황철석은 산화 환경하에서 불안정한 것을 알 수 있다.

[그림 5-2] 철화합물의 안정도



자료 : 이부경(2003) 지질방재공학, 산성광산배수, pp.563-583. 도서출판 대원

전세계적으로 광산의 폐석장에서 황화물과 관련된 산 발생작용의 99% 이상이 황철석과 자류철석의 산화작용에 의한 것이다. 자류철석은 황철석보다 산 발생속도가 더 빠르며 그 밖의 황화광물도 분해되어 산성수를 만들 수 있다. 일반적인 황화광물의 종류와 그 생성 산화물의 종류는 [표] 일반적인 황화물과 그 산화물]과 같다.

5) 동일하면서 결정형태가 서로 다른 광물

[표 5-1] 일반적인 황화물과 그 산화물

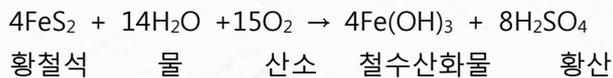
광물	화학성분	황의 산화 수	완전 산화시 수용산물	완전 산화 및 중화반응 후 중성 pH 하의 2차광물
황철석	FeS <sub>2</sub>	-1	Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	3가 철수산화물 및 황산염; 석고
백철석	FeS <sub>2</sub>		Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	3가 철수산화물 및 황산염; 석고
자류철석	Fe <sub>1-x</sub> S		Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	3가 철수산화물 및 황산염; 석고
스미스석	Fe <sub>3</sub> S <sub>4</sub>		Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	3가 철수산화물 및 황산염; 석고
맥커니석	FeS		Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	3가 철수산화물 및 황산염; 석고
비정질	FeS		Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	3가 철수산화물 및 황산염; 석고
황동석	CuFeS <sub>2</sub>	-2	Cu <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	3가 철수산화물 및 황산염; 동수산화물 및 탄산염; 석고
휘동석	Cu <sub>2</sub> S	-2	Cu <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	동수산화물 및 탄산염; 석고
반동석	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>		Cu <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	3가 철수산화물 및 황산염; 동수산화물 및 탄산염; 석고
유비철석	FeAsS	-1	Fe <sup>3+</sup> , AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	3가 철수산화물 및 황산염; 철 및 칼슘 비산; 석고
계관석	AsS		AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	3가철 및 칼슘 비소 화합물; 석고
웅황	As <sub>2</sub> S <sub>2</sub>		AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	3가 철 및 칼슘 비소 화합물; 석고
사면동석	Cu <sub>12</sub> (Sb,As) <sub>4</sub> S <sub>13</sub>		Cu <sup>2+</sup> , SbO <sub>3</sub> <sup>3-</sup> , AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	동수산화물 및 탄산염; 칼슘과 철 비소 화합물; 안티모니; 석고
휘수연석	MoS <sub>2</sub>	-1	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	철수산화물; 황산염, 수연화합물, 석고
섬아연석	ZnS	-2	Zn <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	아연수산화물 및 탄산염; 석고
방연석	PbS	-2	Pb <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	납수산화물, 탄산염, 황산염; 석고
진사	HgS	-2	Hg <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	수은수산화물 ;석고

광물	화학성분	황의 산화 수	완전 산화시 수용산물	완전 산화 및 중화반응 후 중성 pH 하의 2차광물
웨어발트석	CoAsS		Co <sup>2+</sup> , AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	코발트수산화물 및 탄산염; 철 및 칼슘 비소화합물; 석고
적니켈석	NiAs		Ni <sup>2+</sup> , AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	니켈수산화물 및 탄산염; 철, 니켈, 칼슘 비소화합물; 석고
펜트란나이트	(Fe,Ni) <sub>9</sub> S <sub>8</sub>		Fe <sup>3+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>	

자료 : 이부경(2003) 지질방재공학, 산성광산배수, pp.563-583. 도서출판 대원

### 3) 산성배수의 생성 과정

황철석의 산화작용은 발열반응으로서 적색의 철수산화물과 황산을 생성한다. 전체적인 화학반응은 다음 식과 같다.

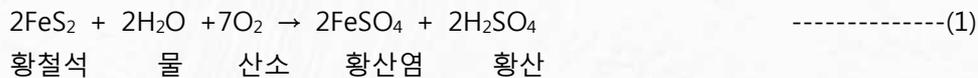


황철석의 산화-환원 순환반응은 [그림 5-3 황철석의 산화-환원 반응 순환도]와 같으며, 산성배수는 다음과 같은 과정이 수반된다.

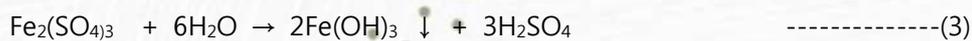
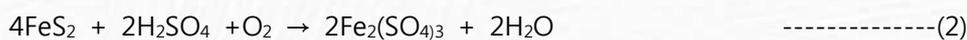
- 산화-환원 반응 및 산의 생성
- 2가 철의 순환적 반응으로 인한 반응속도의 증가
- 철수산화물의 침전으로 인한 수소이온의 증가

이때 황산염을 감소시키는 박테리아가 존재하는 경우 황 혹은 철을 에너지원으로 이용할 수 있는 박테리아가 촉매작용을 해서 산화작용의 속도를 백만 배 이상 증가시킬 수 있다.

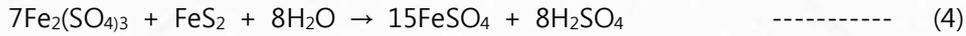
수성환경에서 황화철에 의한 산성배수의 생성단계를 화학적 반응으로 표현하면 아래와 같다.



식 (1)의 화학반응에 의하여 산성배수가 발생하며 이때 2가철과 산이 물속에 부과된다.

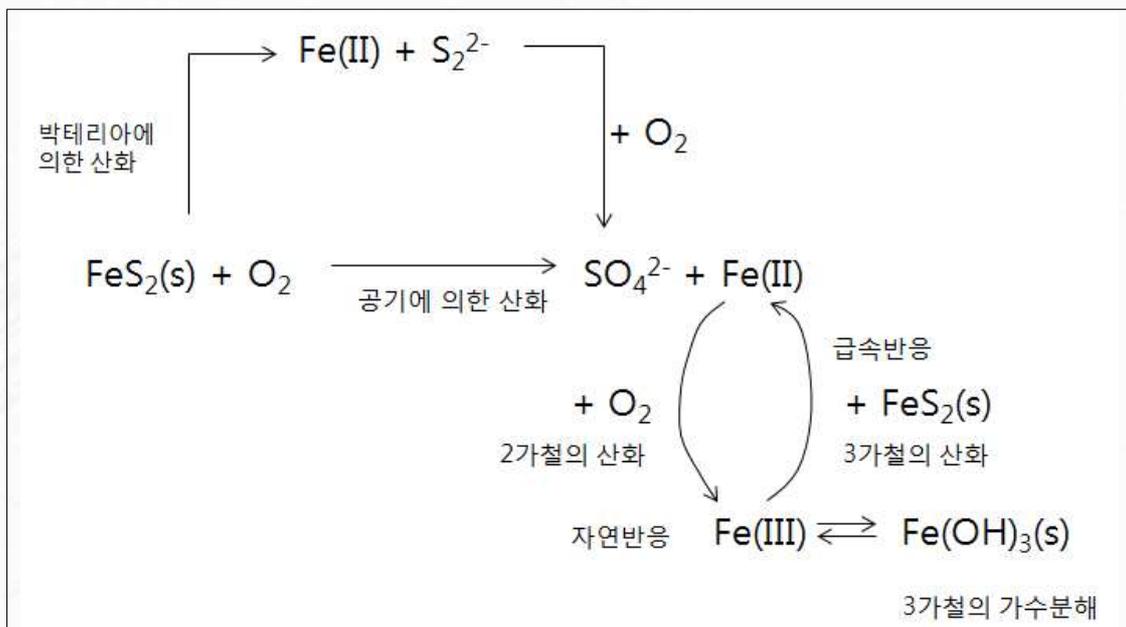


용존된 2가철 이온은 다시 식(2)에 의하여 3가철로 산화되면서 철 수산화물로 침전되며 동시에 산도(Acidity)를 추가로 부과하게 된다. 철 수산화물은 광산배수의 유로에 노란색, 적갈색 등의 퇴적물로 침전된다. 이때 침전된 Fe(OH)<sub>3</sub>는 용해된 Fe<sup>+3</sup>의 조절자 역할을 한다. 즉, 산소가 없더라도 침전된 Fe(OH)<sub>3</sub>가 용해되어 Fe<sup>+3</sup>를 다시 공급하게 되므로 그 반응은 계속된다.



3가철은 그 자체가 산화제이므로 식(4)에 의해서 황철석이 산화될 수 있다. 식(4)에서 알 수 있듯이 일단 산성배수가 발생하면 산소가 없더라도 황철석의 산화작용은 계속될 수 있다. 즉, 한번 황철석이 산화되면 산도가 높아질 뿐만 아니라 황철석의 용해가 가속되어 산성배수는 크게 발생한다. 이러한 이유로 인하여 작은 양의 황철석이 존재하더라도 산성배수의 영향을 주의하여 살펴보아야 한다.

[그림 5-3] 황철석의 산화-환원 반응 순환도(Stumm and Morgan, 1981)



황철석은 국내 대부분의 금속광산에서 흔히 관찰되며 석탄광산의 함탄층 상하부의 흑색 세일에 많이 분포하고 있다.

채굴된 광석 및 그 폐기물 중에는 방연석, 황동석, 섬아연석 등이 포함된 경우가 있는데 이러한 황화광물은 산 발생력은 크게 중요하지 않지만 중금속들의 오염원으로 작용할 수 있다. 비황철석 황화광물이 황철석과 접촉할 때 수용액이 산성을 띠고 있다면 광석 내에 존재하는 황철석은 양극으로 작용하고 기타 황화광물은 음극 역할을 하게 되어 광물의 분해가 이루어지며 이 과정에서 중금속의 용출이 이루어질 수 있다.

## 2. 산성배수와 환경영향

광산배수는 황화광물을 포함하는 금속성분의 산화로 pH가 낮거나 중성이며 유해한 중금속 성분이 고농도로 포함될 수 있다. 산성배수가 발생하는 경우 주변 하천과 토양 및 생태계에 다음과 같이 다양한 영향을 미치게 된다.

### 1) 하천의 중금속 오염

산성배수에 수반되는 유체는 대체로 pH가 2.1~6.5 범위로서 낮으며 Eh가 높은 특징을 나타낸다. 전기전도도 역시 주변 지하수보다 높게 나타난다. 특히 Fe, 황산염, H<sup>+</sup>이온 등의 특정원소의 농도가 증가되어 있고 원암으로부터 용출되어 나온 알루미늄(Al), 망간(Mn)과 중금속인 납(Pb), 수은(Hg), Cd(카드뮴) 등의 농도가 높다. 따라서 이러한 유체가 하천으로 유입되면 하천이 중금속으로 오염된다. 이는 산 발생작용으로 pH가 낮아지면 산성배수는 암석 내의 중금속을 용해시킬 수 있기 때문에 철(Fe), 망간(Mn), 마그네슘(Mg), 구리(Cu), 아연(Zn), 칼슘(Ca) 과 같은 금속을 토양 및 암석으로부터 용해하여 운반한다. 또한 산성배수는 토양을 산성화시키는 역할을 한다. 하천으로 운반된 중금속은 하천변 토양을 오염시키며 인접한 식생에 중금속이 농축되어 폐사하기도 한다. 중금속에 오염된 하천에서는 식물-동물의 먹이사슬로 중금속이 농축되며 오염범위 또한 확대될 수 있다.

### 2) pH가 수중 생물에 미치는 영향

산성광산배수가 하천에 혼입되면 pH가 낮아져서 수중에 사는 생물을 죽게 한다. pH 조건에 따라서 어종의 종류가 달라지며 철산화물 및 철수산화물은 강바닥을 피복하여 물고기가 산란하는 것을 방해한다. 철산화물은 물속을 적색으로 변화시키고 광선을 차단하여 광합성반응을 정지시키며 경도가 증가한다. 용존철의 산화과정은 산소를 소모시키는 반응이므로 DO(용존산소)가 감소되고 2가철은 BOD(생물화학적 산소요구량)와 COD(화학적 산소요구량)를 증가시킨다. pH가 6이상일 때는 생태계에 심각한 영향이 발생하지 않는다.

### 3) 탁도의 증가

하천바닥에 철 또는 알루미늄 수산화물이 침전되고 부유 물질이 발생되므로 탁도가 높아진다. 하천바닥에 피복된 갈색의 침전물은 시각적으로도 혐오감을 주어 경관적 영향을 발생시킨다. 또한 탁도가 증가하면 태양광선을 차단하므로 광합성이 저하되고 이는 수서식물의 생육을 저해하는 결과를 초래한다.

### 4) 기타 영향

산성배수가 하천으로 유입되는 경우 하천에 설치한 콘크리트 교각, 옹벽, 배수로와 하수파이프 및 시추공의 케이싱과 같은 인공구조물을 부식시켜 노후화한다. 일반적으로 pH가 4이상이면 철 표면에 수산화물이 형성되어 부식도가 떨어진다. 수중의 용존 산소가 많을 경우와 강산성, 황산마그네슘염이 증가되면 부식도는 커진다. 마찬가지로 산성배수는 석조문화재에 풍화를 가속시켜 손상을 줄 수도 있다.

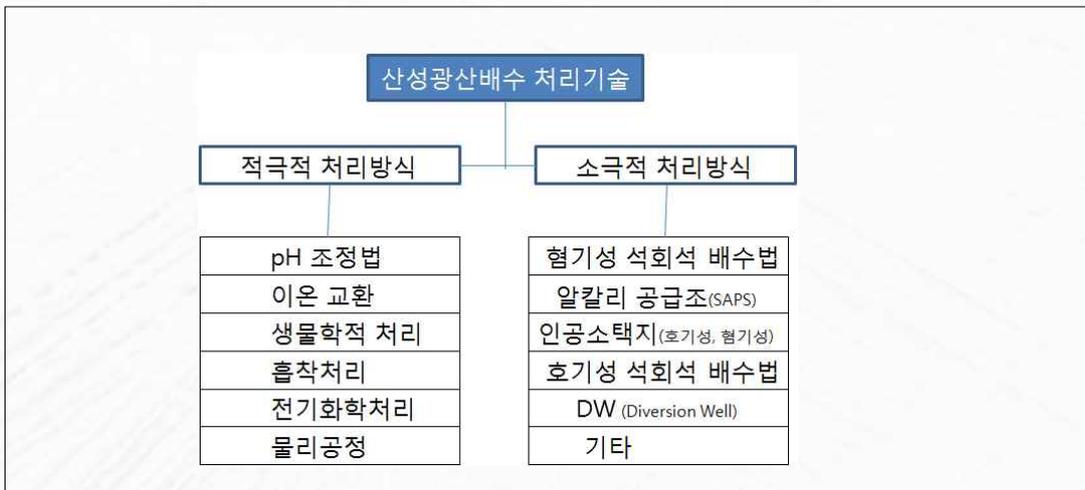
### 3. 산성배수의 처리방법

광산배수를 해결하기 위한 방법으로 갱구폐쇄방법 등과 같이 광산배수의 유출을 근원적으로 차단하거나 배출량을 줄이는 방법과 이미 유출된 광산배수를 처리하는 방법들로 나눌 수 있다.

광산배수 중 오염되어 일정한 수량을 갖는 산성광산배수를 처리하는 기술로서 크게 물리공정 처리, 화학적 처리, 전기화학처리 등과 같은 적극적 처리방식과 석회석 수로 또는 습지를 인공적으로 조성하여 광산배수를 처리하는 자연정화법과 같은 소극적 처리방식이 있다. 이외에도 광산배수를 관로로 유도하여 다량의 물에 희석하는 방법도 소극적 처리방식의 한 예가 된다. [그림]은 산성광산배수 처리기술의 종류를 나타낸 것이다.

일반적으로 유출량이 많고 오염농도가 높으면 적극적 처리방식이 적절하며 이와 반대의 경우는 소극적 처리방법으로 수질개선을 시도한다.

[그림 5-4] 산성광산배수 처리기술의 분류 및 종류



자료 : 권현호, 남광수(2009), 산성광산배수 처리기술의 분류 및 종류, p373, 도서출판 동화기술

#### 1) 적극적 처리방식

광산배수를 모아 인위적으로 화학약품을 첨가하거나 기계적인 교란을 통해 중화 및 산화를 촉진시키는 방법이다. 석회나 가성소다, 탄산나트륨 등과 같은 알칼리제를 사용하여 광산배수의 pH를 높이고 철과 같은 금속류를 높은 pH 조건하에서 산화시켜 금속 수산화물 형태로 미세한 침전을 형성시킨 후 응집제를 이용하여 최종적으로 침전시키는 것이다. 적극적 처리방식 중 주로 사용하는 물리화학적 처리버버은 미생물의 생화학적 정화 원리를 이용하는 자연정화법에 비해 정화효율이 우수하고 정화부지가 상대적으로 적게 소요되는 장점이 있으나 지속적으로 화학약품과 전기동력 등을 사용하므로 유지관리 비용이 많이 소요되는 단점이 있다.

적극적인 광산배수처리법의 예로는 다음과 같은 방법이 있다.

- 물리화학적 방법 : 활성탄법, 응집법, 페라이트법

- 화학적 방법 : 중화처리법, 이온교환법, 역삼투법, 증발, 탈황
- 미생물처리법
- 물리적 방법 : 중력침전, 여과

## 2) 소극적 처리법

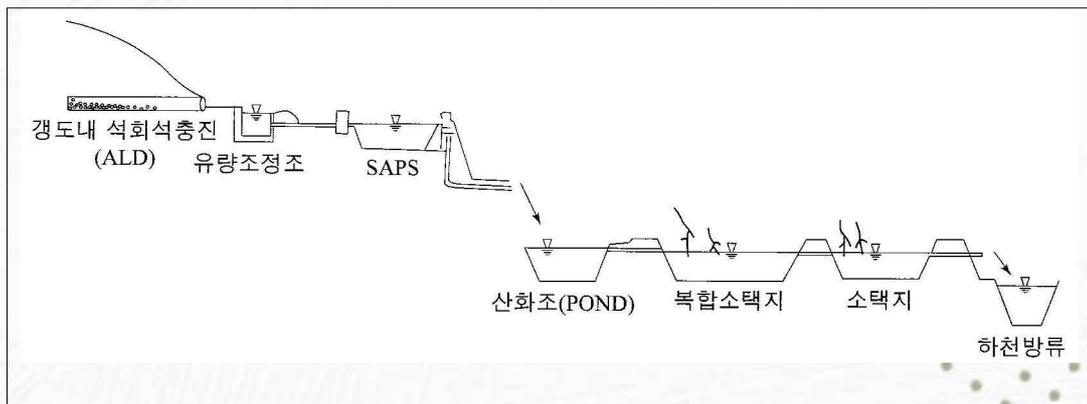
소극적인 광산배수처리법은 미생물의 생화학적 작용에 의해 정화하는 자연정화를 이용하는 것이다. 미생물이 생존할 수 있는 환경과 알칼리도를 증가시킬 수 있는 반응조 내부의 생화학적인 반응을 통해서 광산배수를 정화하는 방법이다. 친환경적이고 유지관리비가 적게 소요되며 동력이 불필요하다는 장점이 있으나 물리화학적 처리법에 비하여 정화효율이 다소 미흡하고 넓은 부지를 필요로 한다는 단점이 있다. 광산배수는 폐광 후에도 수십 년 동안 지속적으로 유출되는 특성이 있어 정화처리를 위한 유지비용 등의 경제적인 문제로 선진국에서는 물리화학적정화법 대신 자연정화법을 일반적으로 채택하고 있으며, 국내에서도 폐광산의 정화방법으로 대부분 적용되고 있다.

소극적 처리법의 예로는 다음과 같은 방법들이 있다.

- 투기법 : 갈호에 투기, 호소에 투기, 폐갱도에 투기, 해양에 투기한다.
- 피복공법 : 흙, 합성수지, 물 등으로 피복하여 공기와 차단한다.
- 배수법
- 인공소택지법
- 갯도폐쇄법

일반적으로 국내 폐탄광에 적용하는 자연정화법의 처리계통도는 그림(5-5)과 같다. 갯내수의 산성 또는 알칼리성에 따라 SAPS조와 산화조의 위치가 조정될 수 있으며 주로 혐기성소택지와 호기성 소택지를 다단계로 설치하여 정화처리를 하고 있다.

[그림 5-5] 폐탄광 자연정화법 처리계통도(남광수, 2004)



자료 : 권현호, 남광수(2009), 산성광산배수 처리기술의 분류 및 종류, p373, 도서출판 동화기술

각종 처리법의 장단점과 특징을 비교하여 [표] 광산배수처리방법의 장단점과 특징비교에

나타내었다.

[표 5-2] 광산배수처리방법의 장단점과 특징비교

정화방법	정화대상 혹은 기능	장점	단점	대상광산	비고
물리화학적 처리	산도, Fe, Mn, Al 등 제거	정화효율이 우 수	지속적인 운영 비가 소요	가행광산	동력/인력 소요
석회석배수법(A LD)	산도 제거(알칼 리도 증가)	유지관리비 저 렴	보조수단 단기적 조치	휴, 폐광산	무동력/무인력 유지관리비용 최소임
인회석배수법	Fe 제거	유지관리비 저 렴	산성수 중화필 요	휴, 폐광산	
갱도밀폐법	산화방지-폐수 유출량감소	시공이 간편	산성배수 발생 억제불확실, 누 수발생	휴, 폐광산	
인공소택지법	산도, Fe, Mn, Al 등 제거	유지관리비 저 렴 장기적 대책	처리시간이 길 다 오염물질 제거 속도가 느림 토지소요량이 과다함	휴, 폐광산	

자료 : 이부경(2003) 지질방재공학, 산성광산배수, pp.563-583. 도서출판 대원

**- 갱도폐쇄법**

갱도폐쇄법은 황철석의 산화과정을 착안한 방식으로 광산으로부터 산성광산배수의 생성을 억제 또는 감소시킬 목적으로 폐광된 광산의 갱구를 폐쇄하는 방법이다. 갱구를 폐쇄시킴으로써 공기의 유입을 차단시키고 또한 지하수 및 갱내수에 의해서 갱도를 수몰시켜 황철석의 산화과정에 필요한 산소를 차단하는 방식이다.

**- 석회석배수법**

산성광산배수를 중화시키기 위해 석회석의 중화특성을 이용하여 석회석과 산성광산배수를 접촉시켜서 산성배수를 알칼리수로 변화시키는 방법으로 혐기성배수방식(ALD)과 호기성배수방식(OLD)이 있다.

혐기성방식은 광산배수 중에 용존산소, 3가철, Al 등이 매우 적게 함유된 경우 혐기적인 석회석 배수층을 형성하고 이곳으로 광산배수를 통과시켜 산성수를 중화처리하는 방식이다. 호기성방식은 석회석을 사용하고 트렌치 형태를 갖는다는 점에서 유사하나 광산배수의 수질이 좀 더 산화환경인 경우에 적용한다.

**- 알칼리공급조법(SAPS, Successive Alkalinity Producing Systems)**

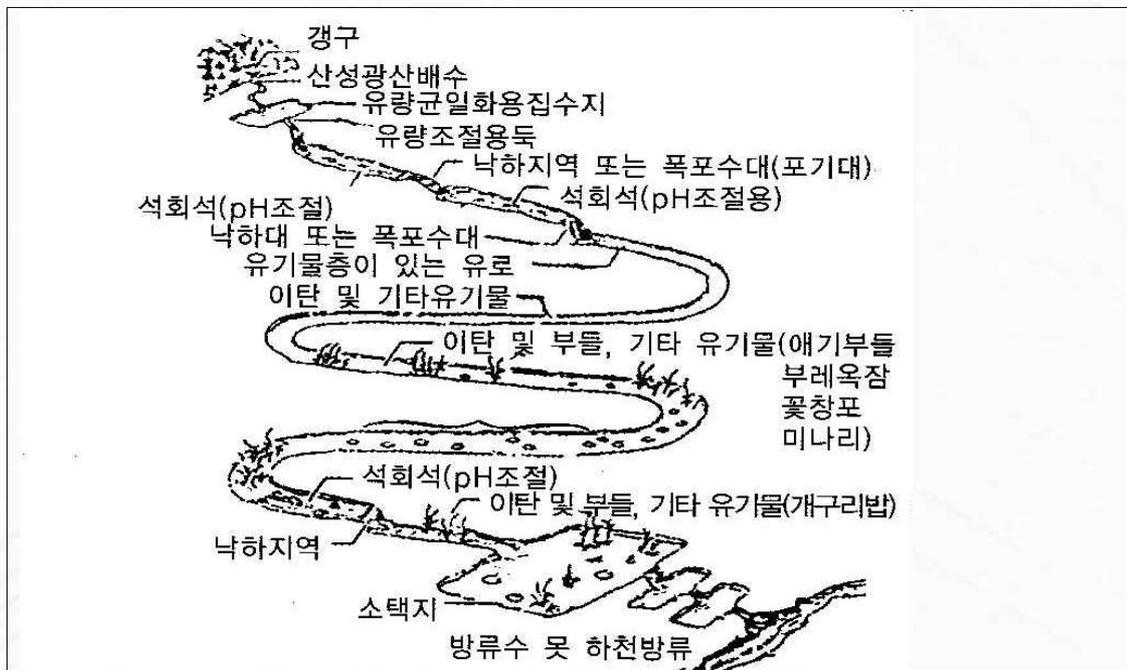
SAPS를 이용한 처리법은 광산배수의 산도가 높고 Fe<sup>3+</sup>의 농도가 높아서 혐기성석회석 배수법이나 알칼리도를 공급하는 기존의 처리시스템으로 광산배수를 처리하기 어려울 때 사용된다. SAPS는 바닥에 석회석을 채우고 그 위에 유기물로 채운다. 유기물 내의 황산염환원 박테리아가 황산염을 황화물로 침전시켜 금속이 황화물로 침전되도록 유도한다. 아울러 하부 석회석층을 활용하여 산성광산배수의 pH가 증가시킴으로써 산도와 중금속

제거를 동시에 수행한다.

**- 인공소택지법**

인공소택지법은 산성광산배수가 발생된 곳으로부터 일정 길이만큼 땅을 얇게 굴착하여 인공적으로 연못을 설치하고 그 곳에 오염물질을 정화시키는 식물을 번식시켜 처리하는 방법이다. [그림]은 인공소택지법의 모식도이다.

[그림 5-5] 인공소택지법



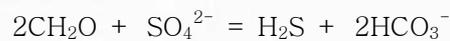
자료 : 이부경(2003) 지질방재공학, 산성광산배수, pp.563-583. 도서출판 대원

인공소택지는 호기성소택지와 혐기성소택지로 구분된다. 호기성소택지는 수심이 10-15cm로서 산소(공기)가 풍부한 소택지로서 산화환경을 형성한다. 호기성환경에서는 산화작용, 수화작용 및 침전작용이 발생하게 되는데 이러한 과정을 통해 광산배수 중에 존재하던 금속성분들이 수산화물 형태로 불용성 금속 화합물로 침강하게 된다. 혐기성소택지는 유기물 퇴비층을 바닥에 첨가하여 공가(산소)가 적은 환원환경을 제공한다. 호기성소택지는 황환원 박테리아(SRB)를 이용하여 황환원반응을 유도함으로써 알칼리도를 발생시키고 금속원소를 황화물 형태로 침전시키며 이러한 과정은 pH를 상승시킨다.

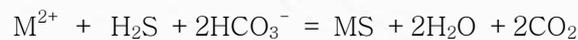
[심화학습]

### 혐기성소택지에서 황산염의 환원과 금속성분 제거

소택지에서 혐기성 환경은 수면 기저부(기질물질) 하부에에서 형성되며 이러한 기질 물질은 보통 유기물질(CH<sub>2</sub>O)로서 만든다. 따라서 광산배수가 유기물질이 존재하는 혐기성 지역을 통과하게 되면 이때 박테리아에 의한 황산이온의 환원작용에 의해 황화물과 알카리도가 발생하게 된다. 즉, 박테리아는 S<sup>4+</sup>를 S<sup>2-</sup>로 환원시키는 동안 산도를 제거하게 되며 S<sup>2-</sup>의 일부는 H<sub>2</sub>S의 형태로 대기중으로 방출하게 된다.



박테리아에 의한 황산염의 환원작용으로부터 광산배수 속에 있던 용존금속은 황화물로 침전되어 광산배수 중에 용존했던 금속의 용존농도가 저감된다. 여기서 M<sup>2+</sup>는 광산배수 중의 금속성분을 의미한다.



이러한 용존 금속이 황화물로 침전될 때 금속의 정화는 pH, 금속황화물의 용해도 및 반응물질의 농도 등에 달려 있다. 용해도적으로 맨 처음 형성되는 금속 황화물은 CuS이며 다음으로 PbS, ZnS, CdS, NiS, FeS, 이고 최후로 MnS이다.

#### - DW(Diversion Well)

DW는 노르웨이와 스웨덴에서 산성비에 의한 하천의 산성화를 막기 위해 고안된 방법으로 석회석을 가득 채운 웅덩이에 산성광산배수를 2m 높이에서 떨어뜨려 중화를 하는 동시에 석회층을 교란시킴으로써 금속 수산화물에 의해 석회석 표면의 피막형성을 억제시켜 중화반응을 지속시키는 방법이다.

#### 참고문헌

남광수(2004) 폐탄광 광해방지사업 추진실적 및 향후 계획, 광해방지와 환경복원 심포지움, pp. 17-39.

Stumm and Morgan (1970) 「Aquatic Chemistry」. Wiley-Interscience

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.

Mason, B and Berry LG (1968)「Elements of Mineralogy」. Freeman.