

도로건설 절취사면의 산성배수 발생저감을 위한 피막형성기술 개발

2007. 8. .

주관연구기관 / 한국지질자원연구원
협동연구기관 / (주)넥스지오

건 설 교 통 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

건설교통부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 “도로건설 절취사면의 산성배수 발생저감을 위한 피막형성 기술 개발”의 최종보고서로 제출합니다.

2007 . 8. .

주관연구기관 : 한국지질자원연구원

원 장 : 이 태 섭

협동연구기관 : (주)넥스지오

대표이사 : 윤 윤 상

■ 총괄연구책임자	/ 선임연구원 김 재 곤	총괄, 피막형성
■ 주관연구기관 참여연구원	/ 선임연구원 박 삼 규	사면구조물
	/ 수석연구원 김 통 권	사면구조물
	/ 선임연구원 홍 완	피막형성, 분석
	/ 선임연구원 전 철 민	피막형성, 분석
	/ 수석연구원 이 진 수	분포조사
	/ 선임연구원 고 경 석	분포조사
	/ 선임연구원 안 주 성	피막형성
	/ 연 구 원 한 소 영	분석
■ 협동연구기관 참여연구원	/ 수석연구원 김 춘 식	협동연구총괄
	/ 선임연구원 이 준 택	현장적용성평가
	/ 연 구 원 임 병 렬	현장적용성평가
	/ 선임연구원 김 형 수	현장적용성평가
	/ 연 구 원 이 주 현	구조물LCC기법
	/ 연 구 원 안 규 천	시공지침작성
	/ 연 구 원 안 주 희	유지관리지침작성
	/ 연 구 원 박 승 익	시공비용, 경제성검토

요 약 문

I. 제목 : 도로건설 절취사면의 산성배수 발생저감을 위한 피막형성기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

최근 사회기반시설 확충의 일환으로 새로운 도로의 건설, 기존도로의 확장 및 선형 개량 등이 활발히 진행되고 있다. 이러한 건설사업에 수반되어 지반굴착이 빈번히 이루어지고 있으며 특히 황화광물(Sulfide Minerals)이 많이 함유된 지반의 굴착으로 암반산성배수가 발생되어 사면의 안정성을 저해하고 환경오염물질이 배출되고 있어 사면의 산성배수는 건설현장의 현안문제로 대두되고 있다. 황철석 표면에 피막을 형성시켜 산성배수 발생의 근원이 되는 황화광물의 산화를 저감하는 기술을 개발하여 현장사면에 적용함이 본 연구의 최종목표이다. 1-3차년도 연구의 목표는 다음과 같다.

(1차년도)

1. 우리나라에서 산성배수가 발생될 개연성이 높은 암석의 분포지역을 개략적으로 파악.
2. 암석에 대한 평가기법을 확립.
3. 산성배수에 의한 피해현황파악.
4. 산성배수 발생억제를 위한 피막형성의 핵심기술의 확보.

(2차년도)

1. 암석유형별 최적피막형성조건 도출.
2. 피막형성처리가 식생성장에 미치는 영향 파악.
3. 피막형성제가 콘크리트 강도에 미치는 영향 파악.
4. 인산에 의한 2차 환경오염문제 해결방안 도출.
5. 현장시험 시공.

(3차년도)

1. 피막의 안정성 및 효율성 검증

2. 피막처리에 따른 사면배수 수질변화 파악
3. 피막처리에 의한 사면안정성변화 파악
4. 원활한 식생공 적용을 위한 개선책 도출
5. 시공비용 산출 및 경제성 검토
6. 시공메뉴얼 및 유지관리 체크리스트 작성

III. 연구개발의 내용 및 범위

(1차년도)

1. 산성배수 발생개연성이 높은 암석의 분포지역 파악.
 - 문헌연구 : 황화광물의 생성조건, 황화광물 함유 암석의 분포지역.
 - 현장조사 : 사면에서 산성배수 발생여부 조사, 사면배수의 현장분석(pH, EC, alkalinity)
2. 암석에 대한 평가기법 확립.
 - 시료채취 및 분석 : 황화광물함량, 광물조성, 최대산발생능력, 순산발생능력, 순산발생량, 산중화능력.
 - 위해도 평가 : 순산발생량/순산발생능력, 산중화능력/최대산발생량, 현장조사 결과의 비교분석.
3. 산성배수에 의한 피해현황 파악.
 - 지반공학적 측면(사면안정성) : 암석의 풍화정도, 사면구조물의 부식상태. 조사, 암석의 풍화 시험, 산성배수에 의한 콘크리트 부식시험.
 - 환경적 측면(오염물질 부하) : 식생상태, 경관, 배수 채취 및 분석.
4. 산성배수 발생억제를 위한 피막형성의 핵심기술의 확보.
 - 표준 황철석의 산화기작 규명 : 반응속도, Fe와 S의 산화특성.
 - 최적피막형성 조건의 도출 : PO_4^{3-} , H_2O_2 , pH, 반응온도.
 - 피막의 황화광물 산화저감 효율 : H_2O_2 농도별 산화시험.
 - 피막의 내구성 : pH 3- 10 환경에서 PO_4^{3-} 용출시험.
 - 표면분석 : 반사현미경, 전자현미경(SEM), 표면분석기(XPS).

(2차년도)

1. 암석 유형별 최적피막형성 조건 도출.

- 안산암, 편마암, 제3기 퇴적암, 폐석탄의 산성배수 발생개연성 시험.
 - 다양한 농도의 H_2O_2 와 KH_2PO_4 를 가지는 피막형성제와 암석분말을 반응 시키고 반응 후 용액을 분석하여 피막형성 정도를 파악.
 - 반응 후 전자현미경(SEM)을 이용하여 피막형성 여부를 확인함.
2. Silicate를 이용한 함황철석 암석의 피막형성 시험.
- 함황철석 안산암 분말과 다양한 농도의 H_2O_2 와 Na-silicate, buffer를 함유한 용액과 반응 시키고 반응 후 용액을 분석하여 피막형성정도를 파악.
 - 반응 후 전자현미경(SEM)을 이용하여 피막형성 여부를 확인함.
3. 피막형성제가 콘크리트 강도에 미치는 영향 파악.
- 시멘트 + 주문진 표준사 + 물(피막형성제 0 - 100%)를 이용하여 성형 후 28일간 양생.
 - 양생 후 콘크리트 코어의 일축압축 강도 시험.
4. 피막형성처리가 식생성장에 미치는 영향 파악.
- 토양 + 암석분말 + 모래의 인공토양을 화분에 채우고 물, H_2O_2 처리, 피막형성처리 후 ryegrass의 발아 및 성장 시험
 - 침출수와 토양 분석.
5. 현장시험시공을 위한 실내모사실험.
- 암석을 아크릴 박스에 채우고 물, 피막처리 후에 산화.
 - 용액의 분석을 통하여 암석으로부터 발생된 산의 양을 계산.
6. 현장시험시공.
- 산성배수 발생 절취사면과 성토사면을 대상으로 피막형처리.
 - 산발생량, 암석의 풍화정도, 식생의 성장상태를 모니터링.

(3차년도)

1. 산성배수 발생 암사면 대상 현장시험시공
 - 피막의 안정성 및 효율성 모니터링
 - 사면배수 수질 및 안정성 변화 모니터링
 - 시공비용 산출 및 경제성 검토
 - 시공매뉴얼 및 유지관리 체크리스트 작성
2. 산성배수 발생기원 토양의 식생피복 시험시공

- 피막처리제 토양주입 장치고안 및 실험
- 식생성장상태 모니터링
- 토양의 화학적 특성변화 시험

IV. 연구개발결과

(1차년도)

1. 산성배수 발생개연성이 높은 암석의 분포지역

강원도 평안층군, 남부지방 중생대 화산암, 충청도 옥천층군, 포항지역 제3기 퇴적암 및 화산암

2. 암석에 대한 평가기법

산중화능력(NP)/최대산발생량(MPA)의 비율, 순산발생능력(NAPP), 현장조사 결과를 비교분석한 결과 암석을 위해도에 따라 3 Group으로 분류하였다.

- Group I : $NP/MPA < 1$ 혹은 $NAPP > 100$.

산성배수의 발생개연성이 높아 발생저감대책 수립이 필요한 암석군.

- Group II : $1 < NP/MPA < 2$ 혹은 $0 < NAPP < 100$.

산성배수 발생개연성이 있어 사면절취 후 산성배수에 대한 사후관리가 요구되는 암석군.

- Group III : $NP/MPA > 2$ 혹은 $NAPP < 0$.

산성배수가 발생될 개연성이 없는 암석군.

3. 산성배수에 의한 피해현황

- 지반공학적인 측면 : 산성배수에 의한 암석풍화의 가속화로 사면의 안정성 저해, 산성배수에 의한 사면구조물(숏크리트, 앵커, 락볼트 등)의 부식 및 노후화.
- 환경공학 측면 : 환경오염물질의 부하(pH, Fe, Mn, 중금속), 식생피복의 불량, 침전물에 의한 경관훼손.

4. 산성배수 발생저감을 위한 최적피막형성조건 도출

- 최적피막형성제 : $0.01M PO_4^{3-}$, $0.01M H_2O_2$, pH 6(NaOAc).
- 반응온도(계절적 영향) : 없음.
- 2차 환경오염방지처리 : $0.1\% Ca(OH)_2$ 용액 29%.

- 피막의 효율성 및 내구성 : 피막에 의하여 황철석 산화가 80% 이상 저감되며 pH 3 - 10 조건에서 피막의 안정성이 입증됨.
- 피막의 두께 : 5Å.

(2차년도)

1. 암석유형별 최적피막형성조건.
 - 0.01M H_2O_2 -0.01M KH_2PO_4 -pH6의 용액이 최적의 피막조건.
2. 피막형성제에 의한 콘크리트 강도변화.
 - 피막형성제의 농도가 25% 이상일 때 콘크리트의 강도가 약 10% 정도 저하됨.
3. 피막처리에 의한 식생성장 영향.
 - 피막처리한 토양에서 ryegrass의 성장은 양호하였으나 무처리 및 H_2O_2 처리 토양에서 ryegrass는 약 2개월 후에 고사하였음.
 - 피막처리 토양과 침출수는 무처리와 H_2O_2 처리 토양에 비하여 pH가 높게 나타났음.
4. 실내모사실험.
 - 3회 피막처리에 의하여 산발생량이 97% 이상 저감되었음.
 - 3회 처리한 암석에서 황철석의 산화를 육안으로 관찰할 수 없었음.
5. 현장시험시공.
 - 피막처리에 의하여 암석의 풍화가 현저히 저하되었음.
 - 피막처리에 의하여 식생성장이 촉진되었으며 식생피복면적이 확장되었음.

(3차년도)

1. 암사면 대상 현장시험시공
 - 시공매뉴얼 및 유지관리 체크리스트 확보
 - 시공비용 : 숏크리트 시공비용과 유사함
 - 피막형성처리에 의하여 암석풍화가 현격히 저감되었음
 - 피막형성처리 사면의 배수는 우수의 pH와 유사하며 산성배수의 발생이 억제됨
2. 산성배수 발생 암석기원 토양의 식생공 적용
 - 피막형성제 주입사면에서 식생성장이 원활함
 - 피막형성제 토양주입에 의하여 A1 식물가용도가 저감됨

- 깊이 15cm 정도 피막형성제 주입이 가능한 장치를 고안하였음

V. 연구개발결과의 활용계획

연구결과를 학술회의, 학술지 등에 발표하여 연구결과를 공유함으로서 다음 분야에 활용할 수 있다.

- 산성배수 발생개연성이 있는 암석의 분포지역 및 피해현황 : 토목공사의 환경영향평가, 조사, 설계의 기초 자료로 활용.
- 암석의 산성배수 발생개연성에 대한 평가기법 : 환경영향평가, 조사, 설계 단계에서 암석에 대한 표준화된 기법으로 활용.
- 산성배수 발생저감을 위한 피막형성기술 : 피막형성기술을 절취사면에 적용함으로서 사면의 안정성 증진과 환경오염부하를 저감할 수 있음.

SUMMARY

Ground has been frequently excavated because of construction of new roads and modification of existing roads in Korea. Ground excavation especially in the area with sulfide rich bedrock generates acid rock drainage (ARD). The ARD on road cut slope has been known to reduce the slope stability, to corrode the slope structure and to discharge the contaminants and is a pending problem in construction field in Korea. The objective of this study is to develop a coating technology to reduce ARD generation from the road cut slope. The research works of the first year covered followings: 1) figure out the area of ARD generating rock, 2) evaluation of ARD generation potential for sulfide containing rocks, 3) investigation of negative effects of ARD in terms of engineering and environment, and 4) search the optimum condition for ARD reduction; the second year: 1) figure out the optimum condition for phosphate coating, 2) development silicate coating technology, 3) development of revegetation technology for acid sulfate soil in a greenhouse, 4) evaluation of the effect of coating solution on concrete strength, 5) field application of coating technology; the third year : 1) field application of coating technology for the reduction of ARD generation and revegetation, 2) evaluation of cost and effectiveness of coating technology, 3) field manual of coating technology.

There were four type rocks in Korea which had ARD generation potential: Okcheon group in Chungcheong-do, Mesozoic volcanic rock in southern province, Peongan group in Ganwon-do, and Tertiary sedimentary and volcanic rocks. We categorized rocks into three groups according degree of harm in terms of foundation engineering and environment: group I ($NP/MPA < 1$ or $NAPP > 100$), group II ($1 < NP/MPA < 2$ or $0 < NAPP < 100$) and group III ($NP/MPA > 2$ or $NAPP < 0$). Where NP stands for neutralization potential, MPA for maximum potential acidity and NAPP for net acid production potential. A strategy for ARD reduction may be required for the group I and a careful

management may be needed for the group II. However, there is no ARD generation potential for the group III. Acid rock drainage on cut slope accelerated rock weathering and corroded slope structures resulting in reduction of slope stability. The cut slope with ARD had bad vegetation coverage and whit and red colored stains resulting bad landscape. There was also an environmental concern due to contaminated drainage with heavy metals and low pH. The optimum coating solution was pH 6 (NaOAc) 0.01M PO_4^{3-} 0.01M H_2O_2 which reduced greater than 80% ARD production. The solution produced a surface coating of 5 Å in thickness on pyrite and the coating was quite stable in pH 3 to 10 solution.

The information for the distribution of rocks with ARD generation potential may be utilized as a basic data in an evaluation of environmental impact, investigation and planning for the future construction projects. The evaluation method for ARD generation potential for rocks can be a standard rock evaluation method. We expect a great demand for the coating technique for ARD reduction in the field of slope management.

Treated cut slope with coating technology reduced ARD and rock weathering. The coating solution reduced Al availability of soil and enhanced plant growth.

목 차

제 1장. 서 론

제 1절. 연구의 필요성

1. 산성배수와 건설사업
2. 황화광물의 산화와 산성배수의 생성
3. 산성배수에 의한 피해
4. 산성배수 발생 절취사면 처리현황과 문제점
5. 산성배수 발생정도와 암석유형의 상관관계
6. 피막형성기술을 이용한 산성배수의 발생 저감

제 2절. 연구의 중요성

제 3절. 연구목표 및 범위

1. 1차년도 연구
2. 2차년도 연구
3. 3차년도 연구

제 2장. 국내·외 기술개발 현황

제 1절. 국내 기술동향

1. 산성배수의 환경영향 관련 국내 기술동향
2. 산성배수 발생억제 관련 국내 기술동향

제 2절. 국제 기술동향

1. 산성배수의 환경영향 관련 국제 기술동향
2. 산성배수 발생억제 관련 국제 기술동향

제 3절. 건설현장에서 산성배수에 의한 피해저감대책 적용 사례

제 4절. 기술동향 분석 결론

제 3장. 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1절. 표준 시료를 이용한 황철석의 산화 및 산성배수 발생특성 규명

1. 이론적 접근 방법
2. 연구방법

3. 연구결과

제 2절. 문헌조사를 통한 산성배수 발생가능지역 가능지역의 추출 및
현장 확인

1. 이론적 접근 방법 및 현장조사
2. 연구결과

제 3절. 암석의 산성배수 발생가능성 및 위해도 평가

1. 이론적 접근 방법
2. 연구 방법
3. 연구 결과

제 4절. 산성배수가 발생하는 절취사면의 현황조사

1. 이론적 접근방법
2. 조사 방법
3. 조사 결과

제 5절. 황철석의 산화가 암석의 물성에 미치는 영향

1. 이론적 접근방법
2. 실험 방법
3. 연구 결과

제 6절. 산성배수에 의한 콘크리트 구조물의 부식

1. 이론적 접근 방법
2. 시험 방법

제 7절. 백화현상과 산성배수 발생 사면의 흰색 침전물의 비교분석

1. 이론적 접근
2. 시료 채취 및 분석
3. 연구 결과

제 8절. 최적 피막형성 조건 도출

1. 이론적 접근 방법
2. 시험 방법
3. 연구 결과

제 9절. 암석 유형별 최적 피막형성 조건 도출

1. 이론적 접근방법

2. 연구 방법

3. 결과

제 10절. Silicate를 이용한 함황철석 암석의 피막형성

1. 이론적 접근방법

2. 연구방법

3. 연구결과

제 11절. 피막형성제가 콘크리트 강도에 미치는 영향

1. 이론적 접근 방법

2. 실험방법

3. 연구결과

제 12절. 피막형성처리를 이용한 특이산성토 식생피복

1. 이론적 접근방법

2. 실험방법

3. 연구결과

제 13절. 코팅처리를 이용한 산성배수 발생 흡사면의 자연식생피복

1. 이론적 접근

2. 실험방법

3. 연구결과

제 14절. 코팅처리제 주입을 활용한 산성배수 발생암석 기원 토양의 식생피복

1. 이론적 배경

2. 실험 방법

3. 연구결과

제 15절. 암반사면 및 성토층으로부터 산성배수 발생억제

1. 이론적 배경

2. 실험 방법

3. 연구 결과

제 16절. 산성암반배수가 발생하는 암반사면의 인산염 피막형성 처리

1. 이론적 배경

2. 실험방법

3. 연구결과

제 17절. 산성배수 발생 암사면 피막형성처리 시방서

제 18절. 유지관리 체크리스트

제 19절. 시공비용 및 타분야 활용성 검토

제 20절. 평가기법 및 대책공법의 현장적용사례

1. 이론적 접근 및 목표
2. 연구방법
3. 연구결과
4. 산성암반배수에 대한 대책공법 검토
5. 결론

제 4장. 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

제 5장. 연구개발결과의 활용계획

제 6장. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7장. 참고문헌

C O N T E N T S

Chater 1. Introduction

Section 1. Necessity of the research

1. Acid drainage and construction work
2. Oxidation of sulfide mineral and generation of acid drainage
3. Damages by acid drainage
4. Present state and problems of cut slope reinforcement
5. Correlation of acid drainage generation and rock type
6. Reduction of acid drainage generation by coating technology

Section 2. Importance of the research

Section 3. Purpose and scope of the research

1. First year
2. Second year
3. Third year

Chater 2. Present state of domestic and foreign technology

Section 1. Present state of domestic technology

1. Present state of domestic technology for environmental problem of acid drainage
2. Present state of domestic technology for inhibiting acid drainage

Section 2. Present state of foreign technology

1. Present state of foreign technology for environmental problem of acid drainage
2. Present state of foreign technology for inhibiting acid drainage

Section 3. Case studies of inhibiting acid drainage

Section 4. Evaluating results of present state of technology

Chater 3. Contents and results of the research and development

Section 1. Characteristics of acid generation by pyrite oxidation

1. Theoretical approach
 2. Material and method
 3. Contents and results
- Section 2. Lay out the area with potential acid sulfate soil material using previous studies and field investigation
1. Theoretical approach and field investigation
 2. Results
- Section 3. Assessment of acid drainage generating potential of rock
1. Theoretical approach
 2. Material and methods
 3. Results
- Section 4. Field investigation of acid-generating cut slopes
1. Theoretical approach
 2. Investigation methods
 3. Results
- Section 5. Effects on physical property of rocks by pyrite oxidation
1. Theoretical approach
 2. Material and methods
 3. Results
- Section 6. Corrosion of concrete structures by acid rock drainage
1. Theoretical approach
 2. Material and methods
- Section 7. Comparative study of efflorescence and white precipitates
1. Theoretical approach
 2. Materials and methods
 3. Results
- Section 8. Optimum condition for coating solution
1. Theoretical approach
 2. Material and methods
 3. Results

Section 9. Optimal coating condition for different rock types

1. Theoretical approach
2. Materials and methods
3. Results

Section 10. Coating pyrite containing rock using silicate

1. Theoretical approach
2. Materials and methods
3. Results

Section 11. Effect of coating solution on strength of concrete

1. Theoretical approach
2. Materials and methods
3. Results

Section 12. Effect of coating treatment on plant growth

1. Theoretical approach
2. Materials and methods
3. Results

Section 13. Enhancing plant growth of acid sulfate soil using the coating technology

1. Theoretical approach
2. Materials and methods
3. Results

Section 14. Revegetation of acid sulfate soil by injection of coating solution

1. Theoretical approach
2. Materials and methods
3. Results
2. Bank fill

Section 15. Reduction acid rock drainage from cut slope and backfill material

1. Theoretical approach
2. Material and methods
3. Results

Section 16. Field application of coating technology on cut slope

1. Theoretical approach
2. Material and methods
3. Results

Section 17. Field manual for coating technology

Section 18. Management check list

Section 19. Cost and economic evaluation

Section 20. A case study of rock for acid rock drainage potential and count measurement

Chapter 4 Degree of research accomplishment and its contribution

Chapter 5 Application plan of research results

Chapter 6 Obtained technological information during research

Chapter 7 References

제 1장 서 론

제 1절 연구의 필요성

1. 산성배수와 건설사업

건설사업 환경영향평가 시 주요항목으로 지형·지질, 동·식물, 수리·수문, 해양환경, 대기질, 수질, 소음·진동, 경관, 폐기물, 사회·경제, 환경 분야 등 총 10개 항목을 검토하도록 법제화되어 있으며 환경영향평가서의 작성은 환경영향평가서 작성 등에 관한 규정(환경부 고시 제2001-7호, 2001. 1. 29)을 준수하도록 되어있다. 특히 지형·지질의 항목작성에서 산성배수가 주변 환경에 대한 영향이 심각할 것으로 예측될 경우에 저감대책을 수립하도록 지침하고 있다.

최근 국가기반시설의 확충으로 국토의 동서 및 남북방향으로 도로 및 철도 건설, 대규모 택지 및 산업단지 건설이 활발히 이루어지면서 지층의 절토가 빈번히 이루어지고 있다. 특히 도로건설 지역에 탄화대, 광화대, 함황철석 안산암, 제3기층의 특이산성토, 광산 등이 있을 경우에는 절취사면에 노출된 황철석 등의 황화광물의 산화로 인해 산성배수가 발생함으로서 사면구조물의 안정성, 주변 환경 및 경관에 악영향을 미칠 수 있다. 최근 도로건설과정에서 배출된 산성배수에 의한 주변지역의 환경오염 및 농경지 피해사례와 민원발생이 보고되고 있으며 이러한 문제해결을 위한 설계변경 및 대책수립과 시행, 공사기간 연장 등으로 막대한 경제적 손실을 초래하고 있다. 최근 국민들의 환경에 대한 인식변화와 환경친화적인 건설사업에 대한 요구의 증대로 향후 건설현장에서 산성배수에 의한 민원이 증가할 것으로 예상된다. 또한 산성배수는 암석과 사면의 풍화와 부식을 가속화하여 사면의 안정성을 저해하고, 사면붕괴에 의한 안전사고의 유발이 우려된다. 산성배수에 의한 사면안정성의 저해는 사면관리비용의 증대를 유발한다. 환경에 대한 사회적 요구에 부응하고 건설현장에서 환경문제와 사면안정성 저해로 야기되는 건설비용의 증가를 줄일 수 있는 환경친화적인 건설기술의 개발이 시급한 실정이다.

2. 황화광물의 산화와 산성배수의 생성

황화광물은 퇴적물의 숙성작용, 유황을 많이 함유한 열수와 암석과의 반응, 열수로부터 직접침전 등 다양한 지질작용에 의하여 생성되다. 따라서 황철석은 퇴적암과 화산암류에 많이 분포하는 경향이 있다. 또한 생성조건에 따라 다양한 광물종이 있다(표 1). 우리나라에서 가장 흔한 황화광물은 황철석(Pyrite)으로서 산성배수 발생의 주 원인 광물이다.

표 1. 대표적 황화 광물들의 화학 조성.

유 형	광물명	화학조성	금속의 산화수	황의 산화수
A ₂ X	Argentite	Ag ₂ S	+1	-2
	Chalcocite	Cu ₂ S		
AX	Galena	PbS	+2	-2
	Sphalerite	(Zn,Fe)S		
	Chalcopyrite	CuFeS ₂		
	Covellite	CuS		
	Cinnabar	HgS		
AX ₂	Pyrite	FeS ₂	+2	-1
	Arsenopyrite	FeAsS		
	Molybdenite	MoS ₂		

황화광물은 지하에서 대기접촉이 차단된 상태로 존재하면 안정하나 건설, 광업활동 등에 의하여 지표에 노출되어 산소와 반응하여 산화·용해된다. 황화광물의 용해, 산화, 침전물의 생성은 산소를 소모하고, 수소 이온을 발생시키거나 소모한다.

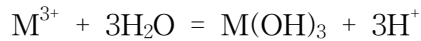
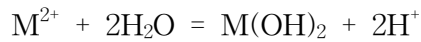
● 황의 산화



● 금속 원소의 산화

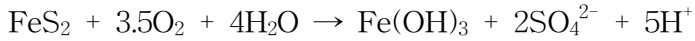
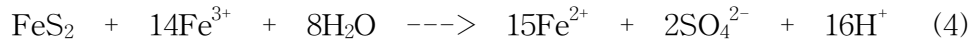
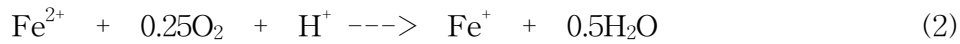
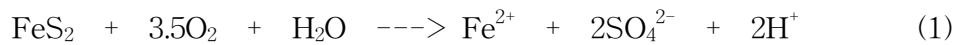


● 침전물의 생성



황의 산화와 금속화합물의 침전은 수소이온을 생산하고, 금속 이온의 산화는 수소이온을 소모한다. 침전물의 생성은 금속 이온의 산화수에 따라 그에 비례해서 수소이온이 발생되며 물의 산도를 증가시킨다. 산성배수의 산성화는 -1 또는 0가 황의 산화 정도 및 금속 이온의 침전 정도에 비례하는 것이다. 배수의 산성화의 주범은 -1가를 갖는 황의 산화이며, 황의 산화가 상당히 진행되어 pH가 2이하로 낮아지는 경우에는 금속 이온의 침전물질이 생성되지 않는다. 황화광물의 산화과정에서 많은 양의 중금속이 용출되는데 이는 토양과 지표수의 산성화와 수반되어 중금속 오염 문제를 야기한다.

황철석은 우리나라의 대부분의 금속 광화대에서 흔히 관찰될 뿐만 아니라, 조선계 및 옥천계의 탄층과 안산암 등의 화산암 내에도 상당량 포함되어 있는 광물이다. 황화물 중, 많은 경우 -1가의 황을 갖는 광물 중 흔히 관찰되는 유일한 광물이다. 황철석은 불순물로 중금속들(Cu, Cd, Pb, As 등)을 많이 함유한다. 황철석은 가장 흔한 황화광물로서 다른 황화광물에 비해 산화과정에서 많은 양의 황산을 생성한다. 또한 미량원소로 함유된 중금속이 황철석의 산화과정에서 용출되어 주변지역의 토양 및 지표수 오염의 원인이 된다. 황철석의 산화에 대한 세부적인 반응 과정은 다음과 같다.



황철석의 산화반응은 미생물의 작용과 순수 무기적인 반응의 복합과정이다. 황철석의 산화에 관여하는 미생물들은 *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus novellus*, *Thiobacillus acidophilus*, *Sulfurlobus acidocaldarius*, *Leptospirillum ferrooxidans* 등이 있다. 반응(1), (2), (3)은 황철석의 산화반응 초기의 주된 반응이나 황철석의 산화가 충분히 진행되어 많은 양의 H^+ 가 생성되면 반응(3)이 진행되지 않고 Fe^{3+} 은 황철석의 산화제로 작용하여 반응(4)가 진행된다. 반응(4)는 많은 양의 황산을 생성하고 산성화가 급속히 진행된다. 황철석의 산화과정에서 Fe^{3+} 는 산소에 의한 Fe^{2+} 의 산화와 미생물작용에 의하여 생성된다. 미생물작용에 의한 Fe^{3+} 의 생성은 산소에 의한 생성보다 약 10^6 배 인 것으로 알려져 있다. 황철석의 산화과정에서 무기적 산화제는 산소와 Fe^{3+} 이며 미생물의 작용이 중요하다.

암석 혹은 토사에 함유된 황철석의 산화에 의하여 생성된 산성배수는 황철석과 인접한 알루미늄규산염광물(aluminosilicate)과 반응하게 된다. Aluminosilicate는 반응과정에서 산성배수에 함유된 H^+ 을 소모하면서 용해된다. Aluminosilicate의 용해과정에 용출된 Al이 산성배수에 첨가되어 산성배수는 고농도의 Al을 함유하게 된다. 또한 다양한 중금속 황화광물이 존재하며 산성배수의 주원인 광물인 황철석은 As, Cd, Cu, Zn 등 중금속을 미량원소로 함유한다. 따라서 산성배수는 고농도의 Fe, Al, 중금속을 함유하는 특징이 있다.

3. 산성배수에 의한 피해

절취사면에서 황철석의 산화에 의해 발생하는 산성배수는 강산성($\text{pH} < 4$)이며 높은 농도의 중금속을 함유하고 있다. 일반적으로 암석의 풍화과정에서 규산염광물의 풍화는 산(H^+)을 소모한다. 산성배수는 암석에 가장 많이 함유된 규산염광물의 풍화를 촉진시켜 암석의 풍화를 가속화하여 암반사면의 안정성에 악영향을 초래한다. 또한 강산성인 절취사면 산성배수는 부식성이 강해 사면처리에 사용되는 배수파이프, 콘크리트 블록, 숏크리트, 인조섬유, 크라우팅 주입제, 강관 및 철근 말뚝 등을 부식하여 구조물의 노후화를 촉진시켜 안정성 및 수명을 저하시킨다. 산성배수가 사면을 따라 흐르게 되면 사면을 산성화시켜 식생 발아 및 성장의 장애를 유발한다. 최근 친환경건설사업의 일환으로 사면녹화공법이 많이 사용되는데 산성배수가 발생하는 사면에 적용된 식생공의 실패 사례가 많이 보고되고 있다. 또한 산성배수가 도로건설사업 중 혹은 완료 후에도 주변 생태계 및 경작지에 유출됨으로서 1) 철수산화물의 침전에 의한 경관 훼손, 2) 수질의 악화 및 그에 따른 하천수 및 지하수의 이용 제약(pH 의 감소, Eh 의 증가, 용존 산소량의 감소, 중금속을 포함한 용존 물질의 증가), 3) 중금속과 산성화에 의한 수서 생태계 및 경작토양의 오염 등의 환경문제를 발생시킬 수도 있다.

4. 산성배수 발생 절취사면 처리현황과 문제점

사면처리의 궁극적인 목표는 사면의 구조적 안정성 확보, 침식방지 및 경관적 복원이라 할 수 있다. 사면안정대책공법은 배수공(Drainage), 절토공(Slope modification), 압성토공(Earth buttresses) 및 지반보강공(Earth retention systems)의 4가지로 구분한다(Schuster, 1992). 또한 산사태가 발생하지 않게 하기 위한 대책공법을 방지기능별로 구분하여 안전율유지법(배수공, 블록공, 피복공, 표층안정공)과 안전율증가법(절토공, 압성토공, 역지말뚝공, 앵커공, 옹벽공, 고압분사주입공)의 두 종류로 크게 구분하기도 한다(Hong and Han, 1994, 1996).

국내 건설현장에서 발생하는 산성배수에 대한 원인은 최근에 밝혀졌으며 많은 현장에서 사전예방보다는 사후처리가 주로 시행되고 있다. 그 동안 산성배수가 발생

된 현장에서 적절한 대책이 시행되고 있지 못한 실정이다. 산성배수 발생 절취사면의 사면처리에 대한 대책공법을 개발하여 적용하고 있는 국내 현장은 거의 없다. 건설현장에서 시공기간에 암석풍화속도가 빠르고 사면 불안정성이 관철되는 사면에 슛크리트공법이 많이 적용되고 있으며 많은 사면이 산성배수 발생과 연관되어 있다. 산성배수가 발생되고 있는 슛크리트공법은 알카리성 시멘트몰타르로 함황철석 암석을 피복하고 대기노출을 차단하여 황철석의 산화에 의한 산성배수의 발생을 일정부분 저감하고 사면의 안정성을 증진시킬 수 있다. 고압으로 시멘트몰타르를 피복한 후에도 암반과 피복물질 사이에 미세공간이 많이 존재한다. 이러한 미세공간은 지하수, 강우와 공기의 유입통로가 되며, 미세공간을 통하여 유입된 용존산소가 피복되지 않은 황철석과 반응하여 사면처리 후에도 산성배수가 지속적으로 생산되는 문제점이 있다.

사면처리 후 생성된 산성배수는 암반과 콘크리트피복 사이의 미세공간, 배수관, 균열을 통하여 표면으로 배수된다. 배수과정에서 산성배수는 미세공간과 균열을 확대시키고 콘크리트를 부식시켜 구조물의 수명과 안정성에 악영향을 준다. 배수과정에서 시멘트와 반응하여 중화되는데, 산성배수에 함유된 철과 알루미늄은 콘크리트표면에 붉은색과 흰색 물질로 침전되어 경관을 훼손한다.

사면에 시공되는 식생공은 사면안정성을 증대하고 경관을 회복하는 효과가 있다. 산성배수가 발생되고 있는 사면에서 기존 식생공법을 적용하여 실패한 사례가 많이 보고되고 있다. 기존 식생공법은 사면에서 발생한 산성배수로부터 식생을 보호할 수 있는 중화능력과 산성배수 발생억제 능력이 없다. 따라서 산성배수가 발생되고 있는 사면에 적용된 식생공법은 식생이 발아 후 뿌리가 성장하면서 산성배수와 접촉하여 고사한다. 식생공법 적용이 실패한 사면은 토사의 침식과 암석풍화 가속화로 사면 유실과 안정성이 크게 저하된다. 따라서 산성배수가 발생되고 있는 사면에 성공적으로 녹화할 수 있는 공법의 개발과 적용이 시급한 실정이다.

5. 산성배수 발생정도와 암석유형의 상관관계

황화광물은 열수변질대 암석, 석탄, 환원환경기원의 퇴적암 내에 다량 함유되어 있다. 황화물 구성 원소의 산화수는 외부와의 물질 교류가 차단되고, 온도 압력 등의 조건에 큰 변화가 없는 한 유지된다. 그러나 도로건설, 터널굴착, 광산개발 등을 위해서 상위 지층을 제거하고 사면을 절취하게 되면 지하에 존재하던 황화물은 산소를 포함하는 대기 및 용존 산소를 함유하는 물과 접촉하게 되면서 용해 및 산화된다. 산화과정에서 황산이 생성되고 중금속이 용출된다. 절취사면에서 생성된 산성배수와 산성배수에 함유된 중금속은 환경오염과 사면구조물의 안정성을 저해하고 수명을 단축한다. 황화광물이 함유된 암석의 유형에 따라 산성배수의 중화 및 2차광물의 생성 특성이 좌우된다. 황철석을 함유한 암석이 탄산염광물을 많이 함유한 경우 황철석 산화에 의하여 생성된 산성배수는 쉽게 중화된다. 반면 산성배수에 의하여 탄산염광물은 쉽게 용해됨으로 암석의 풍화가 촉진되고 붕괴가 쉽게 발생한다. 암석이 중화능력과 용해도가 낮고 규산염광물을 많이 함유한 경우 산성배수가 주변지역으로 유출되어 환경오염을 많이 유발한다. 또한 황철석을 함유한 암석의 종류에 따라 산성배수에 함유된 용존이온의 종류와 농도가 다양하며 부산물인 2차광물의 종류가 다르다. 산성배수의 중화 및 2차광물의 생성과정의 물리화학적 반응과정은 본 연구에서 개발하고자하는 광물표면의 피막형성에 영향을 줄 수 있어, 암석 유형에 따른 산성배수의 발생특성을 파악함으로써 효율적인 피막형성조건을 도출할 수 있다.

6. 피막형성기술을 이용한 산성배수의 발생 저감

절취사면에서 발생하는 산성배수는 강산성($\text{pH} < 3$)으로서 콘크리트, 철재 구조물에 대한 부식성이 매우강하다. 앞에서 지적한바와 같이 우리나라에서 산성배수가 발생하는 절취사면에 많이 이용하는 슛크리트공법은 처리 후에도 사면에서 산성배수가 지속적으로 발생되어 구조물을 부식시키고 사면의 안정성을 해치는 문제를 노출시켜왔다. 산성배수는 콘크리트와 반응하여 콘크리트를 부식시킨다. 콘크리트의 부식은 균열의 확대, 암반으로부터 콘크리트 피복의 이완, 표면부식 등을 초래하여 콘크리트피복의 수명단축과 안정성에 악영향을 준다. 또한 피복표면을 따라 흐르는

산성배수는 표면에 붉은색 혹은 흰색의 산화철과 수산화알루미늄을 침전시켜 경관을 훼손한다. 주변지역으로 유출된 산성배수는 토양과 지표수의 산성화와 중금속오염 문제를 야기 시킨다. 황철석을 인산염(Phosphate)으로 처리하면 표면에 노출 및 물속으로 용출되어 나온 철과 반응하여 철인산염 화합물을 표면에 침전 시킨다. 표면에 침전된 철인산염 화합물은 용존 산소의 표면 접촉을 차단하여 황철석의 산화를 저감시킨다. 철인산염 화합물의 피막형성은 산성배수의 발생을 저감시키고 산성배수에 의한 환경오염, 구조물의 부식, 사면 안정성의 저해, 경관훼손 문제를 저감할 수 있다. 표면에 형성된 철인산염 피막은 장기적으로 산성배수의 발생을 저감함으로써 구조물의 부식에 의해 발생하는 사면안정성 보전을 위한 사후관리가 쉬워질 것으로 기대된다.

제 2절. 연구의 중요성

산성광산배수(AMD, Acid Mine Drainage) 및 산성암반배수(ARD, Acid Rock Drainage)에 의한 환경오염은 이미 오래전에 인식된 현상이며, 선진국에서는 이에 대한 본격적인 연구를 이미 1970년대 이전부터 시작하였다. 우리나라에서는 1980년대로 접어들어 많은 광산들이 폐쇄되면서 폐갱구를 통해 흘러나온 물이 주변 하천을 심각하게 오염시키자 산성광산배수의 폐해를 인식하기 시작하였다. 최근 도로 건설공사 과정에서 발생한 산성배수에 의한 환경오염과 농경지 피해사태가 보고되고 있어 건설공사 현장에서 산성배수에 의한 환경오염문제가 사회이슈로 등장할 개연성이 많다.

산성배수는 환경오염문제 뿐만 아니라 사면에 설치된 콘크리트 및 철재 구조물의 부식시킨다. 이러한 구조물의 부식문제는 절취사면의 안정성과 도로의 안전 확보와 직결된다. 또한 산성배수에 의한 사면의 안정성과 도로의 안전 확보를 위한 시공 및 사후관리 비용의 증가로 연결된다.

산성배수가 생성될 개연성이 있는 지역을 사전에 파악하고 조사·설계단계에서부터 산성배수 생성저감대책을 수립하여 설계에 반영함으로써 친환경적인 건설공사를 수행할 수 있다. 산성배수 생성 개연성이 있는 지역의 파악은 환경친화적인 건

설사업의 수행을 위한 시발점이라 할 수 있다.

최근 국민들의 환경에 대한 인식변화와 쾌적한 환경조성에 대한 요구가 증대되고 있다. 또한 환경오염과 안전관리 문제에 대한 민원이 지속적으로 제기되고 있다. 이러한 사회변화의 추세로 볼 때 환경친화적인 건설사업에 대한 국민들의 압력이 가중될 것으로 판단된다. 환경친화적인 건설사업에 대한 국민의 요구에 부응하는 건설기술의 개발과 실용화가 절실히 요구되고 있다.

제 3절. 연구목표 및 범위

본 연구는 건설핵심기술연구개발사업의 일환으로 황철석의 표면에 철인산염으로 코팅하여 황철석의 산화를 억제하여 도로건설과정에서 생성되는 절취사면에서 발생하는 산성암반배수(Acid Rock Drainage)를 저감함이 최종목표이다. 이러한 목표를 달성하기위하여 다음과 같이 연차별로 연구를 진행한다.

1. 1차년도 연구

■ 연구목표

- 황철석의 산화반응에 따른 산성배수 생성특성 파악
- 황철석 표면의 철인산염 화합물 형성 최적조건 도출
- 암석 유형별 산성배수 발생 특성 파악
- 산성배수가 생성되는 절취사면의 구조물 현황조사

■ 연구내용 및 범위

- 지질도 등 참고문헌 조사를 통하여 함황철석 암석이 분포하거나 분포할 개연성이 많은 지역을 선정하여 지질조사 및 시료채취
- 채취된 시료의 황철석 함량 및 입도분포, 광물조성, 산에 대한 완충능(Buffer capacity), 화학조성 등을 분석
- 표준 황철석의 산화반응과 산성배수 생성 특성을 실내시험을 통하여 조사

- 황철석을 인산염으로 처리하여 철인산염 피막 형성특성을 시험하고
표면분석을 통하여 생성된 피막의 두께와 균질성을 측정
- 최적의 피막형성조건을 도출하고 피막에 의한 산성배수의 발생 억제력을
측정
- 지질조사와 병행하여 유형별로 절취사면에서 산성배수 생성특성과 구조물의
안정성 조사

2. 2차년도 연구

■ 연구목표

- 함황철석 암석 유형별 황철석 표면피막형성 최적조건 도출
- 피막형성기술 적용이 숯크리트공법의 적용에 미치는 영향 파악
- 피막형성이 식생공 적용에 미치는 영향파악
- 피막형성기술의 현장 적용성 시험

■ 연구내용 및 범위

- 암석 유형별 황철석 표면피막형성 최적조건 도출을 위한 인산농도, 산화제의
종류 및 농도, 온도, 시간 등 다양한 조건에서 피막형성 시험
- 피막형성제의 주변 환경 영향 검토
- 형성피막의 균질성과 두께 측정을 위한 표면분석
- 표면피막이 암반과 콘크리트 표면의 접착성에 미치는 영향평가지험
- 표면피막 형성에 사용되는 처리약품에 의한 콘크리트 부식성 평가시험
- 온실에서 제3기 퇴적암을 대상으로 피막형성처리를 하고 식생의 발아 및
성장에 미치는 영향 파악
- 현장 적용성 시험: 적용 및 산발생량 현장 측정

3. 3차년도 연구

■ 연구목표

- 표면피막형성기술을 이용한 절취사면에서 산성배수 저감기술의 현장적용 및
개선
- 시공비용 산출 및 경제성 검토

■ 연구내용 및 범위

- 피막형성의 최적조건을 현장에 적용하고 산성배수의 발생량 저감정도를 측정
- 모니터링을 통하여 피막의 효용성 시험
- 배수의 중금속, 철, 알루미늄의 농도변화와 암반표면에 생성되는 침전물을 조사
- 처리제 살포에 의한 암반의 안정성 변화를 조사
- 생성된 피막의 상태 및 안정성을 조사
- 산성배수에 의한 식생토공법 적용 영향 및 개선책 시험

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

산성배수에 의한 피해저감기술은 크게 산성배수 처리와 산성배수 발생억제로 나눌 수 있다. 산성배수 처리방법은 오랜 기간 동안 많은 연구개발이 진행되었으며 다양한 기술이 현장에 적용되고 있다. 처리방법은 생물학적 및 무생물학적, 적극적 처리(active treatment) 및 소극적 처리(passive treatment)로 나눌 수 있다(표 2).

표 2. 산성배수 처리기술.

무생물학적 처리	적극적 처리	중화제 첨가, 산화 및 중화제 첨가
	소극적 처리	anoxic limestone drainage, oxic limestone drainage, open limestone channels, limestone diversion well, alkalinity producing system, reverse alkalinity producing system, alkalinity producing cover, slag leach bed, successive alkalinity producing system, permeable reactive barrier
생물학적 처리	적극적 처리	off-line sulfidogenic bioreactor
	소극적 처리	aerobic wetland, compost reactor/wetland, PRB, packed bed iron-oxidation bioreactor, microbial reactor system, vertical flow wetland, permeable reactive barrier

산성배수 발생억제기술은 산화제의 제거, 산화제 생성억제, 산화제와 황철석의 접촉차단 기술로 나눌 수 있다(표 3).

표 3. 산성배수 발생억제 기술.

원 리	세 부 기 술
산화제 제거	- 산소제거 : 유기물 첨가 - Fe^{3+} 제거 : 중화제 첨가
산화제 생성억제	- Fe^{3+} 생성억제 : 살균제 살포
산화제와 황철석의 접촉차단	- 대기접촉차단 : 지하공동 저장, 수면하 저장, 지상차단, 고형화 - 산소와 Fe^{3+} 의 황철석 표면접촉 차단 : 표면코팅

산성배수 발생억제기술 중 대기접촉차단기술은 연구개발이 많이 진행되어 많은 현장에서 적용되고 있다. 살균제 살포를 이용한 Fe^{3+} 생성억제기술은 살균제 살포에 의한 2차 환경오염문제로 현장적용에 많은 제약을 가지고 있다. 표면코팅기술은 최근 많은 연구자가 기술개발을 시작하고 있으며 일부기술은 pilot scale의 현장적용 시험이 진행된 신기술에 해당된다. 산성배수 발생억제를 위한 표면코팅기술은 향후 많은 연구와 투자가 진행되어야 할 분야이다.

제 1절. 국내 기술동향

1. 산성배수의 환경영향 관련 국내 기술동향

국내에서 토양오염에 대한 국민들의 관심 확대와 함께 제정된 토양환경보전법에 따라 90년대 후반부터 광업활동에 의한 토양오염에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 산성암석배수(ARD)나 산성광산배수(AMD)의 영향과 관련된 국내 연구는 주로 단위광산에서의 폐광석, 광미 및 주변 토양의 오염현황에 관한 연구가 대부분이다. 건설사업 과정에서 발생하는 산성배수가 환경에 미치는 영향에 대한 심도 있는 연구는 전무한 실정이다. 최근 일부 전문가들이 건설사업 현장에서 산성배수에 의한 환경오염과 사면 구조물의 안정성에 대한 문제를 인식하기 시작하고 있으나 산성배수의 제어에 대한 기술개발을 위한 연구는 시작되고 있지 않다. 환경관련 법규(환경부고시 제2001-7호, 2001. 1. 29)에 건설사업 현장에서 산성배수와 관련된 문제의 평가와 대책수립이 명문화되어있고, 국민의 환경친화적인 건설에 대한 요구가 증대되고 있는 현실을 비추어볼 때 향후 관련분야의 연구가 활발히 이루어질 것으로 판단된다.

산성배수 관련 대부분의 국내연구는 폐광산 지역에서 발생하는 산성광산배수(AMD)와 주변지역의 토양 및 하천수의 오염에 대한 연구이다.

● 폐금속광산 환경 오염평가 및 정화기술 연구 (2001-2003)

- 광미와 폐광석의 황화광물의 풍화과정 연구 및 용해된 금속이온의 자연고정
- 산화환경에서 황화광물의 중금속 용출특성에 따른 지표수/지하수 오염

가능성 평가

- 혐기성 소택지 등 산성배수처리를 위한 자연정화 기법의 적용

● 휴.폐광산 주변의 토양과 농작물에 대한 중금속 오염 연구

경산광산(이순영, 1993), 삼보광산(김상현, 전효택, 1993; Jung, Thornton, 1996), 시흥광산(황호송, 전효택, 1995), 광양광산(박천영 외, 1995), 신예미광산과 거도광산(전동진 외, 1995), 모악광산(나춘기, 전서령, 1995) 등.

● 광산주변 수계의 산성광산배수와 중금속 오염에 대한 연구

옥동천(Cheong and Thornton, 1994), 동해탄광(오대균 외, 1995), 달성광산(정명채, 1996), 다덕광산(정영욱 외, 1997), 대성탄광(송석환 외, 1997) 등.

● 광산주변 토양에서 자라는 농작물의 중금속 흡수와 생태계에 미치는 영향 연구

경산광산(이순영, 1993), 모악광산(나춘기, 전서령, 1995), 유구-광천광화대(김경웅 외, 1995), 동진광산(이무성 외, 1996) 등.

● 광산오염 지역에서 2차광물의 생성이나 광산오염 방지와 대책에 관한 연구

최정찬(1994), 김정엽 외(1995), 민정식 외(1997), 정영욱 외(1997), 김경호 외(1997), 이진국과 이재영(1998), 이기철 외(1998), 전효택 외(1999) 등.

2. 산성배수 발생억제 관련 국내 기술동향

국내의 일부 환경오염이 심각한 폐광산을 중심으로 광해방지사업이 진행되고 있으나 복토, 매립, 하천정비를 중심으로 이루어지고 있다. 산성배수가 발생될 개연성이 있는 광미와 폐석의 복토와 매립은 황철석을 대기접촉으로부터 차단함으로써 산성배수의 발생을 저감 혹은 차단하는 것이다. 일부 환경공학, 지질학분야에서 폐광산 주변지역에 적치되어 있는 광미장으로부터 산성광산배수의 발생을 억제하고 식생피복을 원활히 하기위한 방법으로 인산염을 많이 함유하고 있는 동물 뼈를 이용하는 방법이 연구되고 있다. 그러나 산성배수 발생억제에 대한 연구는 초기단계에 머물러 있으며, 가시적인 성과가 도출되지 않고 있다. 동물 뼈를 이용한 산성배수 발

생제어는 절취사면의 특수성을 고려할 때 절취사면에서 발생하는 산성배수의 발생을 저감하는데 응용되기가 어렵다고 판단된다.

제 2절. 국제 기술동향

1. 산성배수의 환경영향 관련 국제 기술동향

산성암석배수(ARD)나 산성광산배수(AMD)는 중금속의 유동도, 독성, 생체흡수도, 화학적 상호반응 등 거동에 크게 영향을 미친다. 이는 중금속의 존재형태(metal speciation)가 물리, 화학 및 생물학적 과정(processes)을 조절하여 환경매개체(즉, 공기, 물, 생물체, 토양 및 퇴적물)사이에서의 중금속의 이동(transport)과 변형(transformation)을 유도하기 때문이다(Allen et al., 1995). 이러한 중금속 원소들의 주변 환경에 대한 잠재적 및 실제적인 영향(impacts)을 평가하기 위한 연구들로서 총량분석, 광미-물 상호반응에 대한 실험실 규모의 simulation 연구(Canibano et al., 1990; Jeng and Bergseth, 1992; Humez et al., 1997; Kedziorek et al., 1998). 중금속의 광물학적 형태(Fuge et al., 1993; Walder and Chavez, 1995; Davis et al., 1996), 연속추출방법(Tessier et al., 1979; Soon and Bates, 1982; Cottenie and Verloo, 1984; Clevenger, 1990; Sauerbeck and Hein, 1991; Singh et al., 1996; Cooper and Morse, 1998; Ščančar et al., 2000), 동위원소연구(McLaren and Crawford, 1973; Frossard et al., 1994) 및 in-vitro acid extraction(Davis et al., 1993; Ruby et al., 1996) 등의 접근이 이루어졌다.

미국에서는 1990년대부터 광산 폐석과 폐수에 의한 재해와 관련된 신기술 개발에 대형사업의 형태로 집중투자(SITE 프로그램)하고 있으며, 미국 환경청(EPA)의 환경복원 추진전략은 2000년대부터 환경친화적 저비용 기술 중심으로 오염의 저감화 및 복원기술 개발에 중점투자를 하고 있다. 이에 따라, 전체 환경재해 분야 가운데 저감화 및 복원기술 개발에 투자비율이 50% 이상이며, 대부분 정부주도의 집중 프로그램 투자로 연구 성과를 극대화하고 있다.

선진국에서는 폐광산지역 광산배수를 처리하기 위해서 광산배수 특성 및 폐광산

주변 환경에 적용 가능한 독창적인 자연정화기술이 발전되어 왔다. 미국에서는 1980년대부터 500개 이상의 석탄광 배수처리를 위해서 자연정화처리시설이 설치되었다. 일부 자연정화시설들은 전통적인 물리화학적 처리를 대신해서 가동 중에 있으며 일부는 화학 처리 전단계로 사전처리 공정으로 운전되고 있다. 미국의 경우 산성광산배수를 물리 화학적으로 처리할 경우 1일 약 100만 달러 이상의 수처리 비용이 소요될 것으로 추정하고 있다(Kleinmann and Hedin, 1993). 선진국에서 연구 개발된 광산배수 자연정화법을 요약한 내용이다.

○Limestone Drains: 석회석과 산성배수를 접촉시켜서 산성배수를 중성으로 변화시키는 방법.

○SAPS(Successive Alkalinity Producing System): 광산배수의 산도가 높고, Fe^{3+} 의 농도가 높아서 ALD나 alkalinity를 공급하는 기존의 처리시스템으로 광산배수를 처리하기 어려울 때 사용.

○인공소택지 (Constructed Wetland): 토양이나 나무에 의한 흡착, 식물에 의한 중금속 흡수, 여과, 미생물작용, 황산염 환원, 황화물 형성에 의한 오염 저감에 사용.

2. 산성배수 발생억제 관련 국제 기술동향

산성배수는 황철석에 함유된 철과 유황이 산소와 반응하여 황산이 생성됨으로서 발생한다. 전통적으로 산성배수 발생의 차단 및 억제는 황철석을 함유한 암석을 매립하거나 복토하여 대기 중의 산소와의 접촉을 물리적으로 차단하는 방법이 이용되고 있다. 이러한 전통적인 방법은 완벽한 산소 공급의 차단이 거의 불가능하고 절개사면에서 발생하는 산성배수의 발생억제에 많은 제약점이 있다. 우리나라의 산성배수 발생 사면에서 처리법인 쏫크리트공법도 이와 유사한 방법이라 할 수 있으나 앞에서 지적한 것과 같이 효율성이 떨어진다.

최근 미국에서 살균제를 사용하여 황철석의 산화에 관여하는 미생물의 활동을 억제하는 방법으로 산성배수의 발생을 억제하는 기술을 개발하여 폐석탄광(Dawmont, West Virginia, USA)으로부터 산성배수 유출을 줄이는데 성공적으로 적용하였다. 이는 황철석의 산화 속도를 실제로 결정하는 Thiobacillus

ferrooxidans와 같은 미생물의 생장에 치명적인 화합물(sodium lauryl sulfate, sodium benzoate, 일종의 살균제)을 공급해 황철석의 활발한 산화를 억제하는 방법이다. 이는 살균제가 또 다른 수질 오염을 유발할 수 있으며, 살균제를 지속적으로 살포해야 하는 단점이 있다.

최근 캐나다에서 금속의 부식방지를 표면처리기술인 인산처리기술(phosphoric acid treatment)을 응용하여 광미로부터 산성배수의 발생을 저감하는 기술을 개발하여 실용화를 모색하고 있다(Nyavor and Egiebor, 1995). 황철석의 산화과정에서 표면으로부터 용출되어 나오는 철을 인산과 반응시키고 철인산염 화합물을 황철석 표면에 침전시켜 피막을 형성하게 하는 기술이다. 표면에 형성된 철인산염 화합물 피막은 용존 산소가 황철석과 접촉하고 반응하는 것을 차단하는 물리적인 차단막 역할을 하게 된다. 표면피복에 의한 산소접촉차단은 황철석의 산화를 방지하여 산성배수의 발생을 억제한다.

제 3절. 건설현장에서 산성배수에 의한 피해저감대책 적용 사례

우리나라의 건설현장에서 산성배수에 의한 환경오염 저감대책이 적용된 사례가 없으며 향후 건설현장에서 오염저감대책의 수립 및 적용이 기대된다. 외국에서 적용된 대표적인 사례는 다음과 같다.

● Vancouver Island Highway Project(VUHP)

- Vancouver Island, British Colombia, Canada
- 총 사업비 : 12억 캐나다 달러
- 환경영향평가 및 모니터링 비용 : 1천만 캐나다 달러
- 산성배수 피해저감대책 비용 : 수천만 캐나다 달러
- 지반특성 : 황철석을 다량 함유한 퇴적암
- 산성배수 저감대책 : 절토랑의 최소화, 산성배수 발생가능 폐석을 복토, 차수벽 등의 설치로 대기접촉차단, 사면에 우수배제로 설치.

● Acidic Airport Drainage

- Halifax International Airport, Nova Scotia, Canada

- 지반특성 : 다량의 황철석을 함유한 Slate
- 산성배수 처리비용 : 7백만 캐나다 달러(처리시설 설치비) + 유지관리비
- 처리방법 : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 이용한 산성배수의 중화

제 4절. 기술동향 분석 결론

우리나라에서 산성배수 처리에 대한 기술개발은 주로 폐광산에서 발생한 산성광산 배수(AMD)를 효율적으로 처리하는데 치중』되어왔다. 산성배수의 발생억제를 위한 기술개발은 초기단계이다. 발생한 산성배수의 처리는 처리시설의 유지·관리에 많은 비용이 필요한 문제점이 지적되어왔다. 따라서 최근 선진외국에서 이러한 문제점을 해결하고자 미생물 조절, 황철석 표면피복 등을 이용하여 함황철석 물질로부터 산성배수의 발생억제를 위한 기술이 개발하여 실용화를 시도하고 있다.

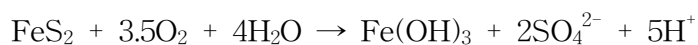
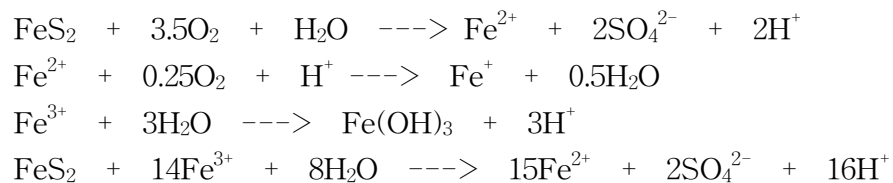
전통적인 산성광산배수 처리기술은 이론적으로는 도로건설 절취지역의 산성배수의 처리에 활용이 가능하지만 유지관리에 어려움이 있고 사면 구조물의 안정성 확보에 도움이 되지 않는 단점이 있다. 절취사면에서 산성배수에 의한 환경오염저감대책은 최근 캐나다에서 개발된 피막형성에 의한 발생억제 기술의 적용이 적합하다고 판단된다. 캐나다에서 개발된 기술은 실내실험에서 산성배수의 발생억제에 우수성이 입증되었다. 또한 피막형성에 의한 발생억제대책의 수립 및 적용은 전통적으로 폐광산에 적용해온 발생억제 기술보다 환경오염의 방지뿐만 아니라 구조물의 수명과 사면안정성 확보에 유리하고 판단된다. 선진국에서도 산성배수 발생저감기술이 개발되어 실용화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 실용화 연구는 초기 단계에 머물러 있다고 할 수 있다. 산성배수 발생저감기술 개발에 대한 적극적인 투자와 기술개발로 독자적인 전문기술의 확보를 통한 국제경쟁력의 확보가 필요하다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1절. 표준 시료를 이용한 황철석의 산화 및 산성배수 발생특성 규명

1. 이론적 접근 방법

절취사면의 암반산성배수의 근원물질인 황철석(FeS_2)은 대기와 차단되어 지하에 존재하면 안정된 상태가 유지되나 지표에 노출되어 용존 산소와 반응하면 황산을 생성하고 황철석에 미량으로 함유된 중금속이 동시에 용출된다. 산화과정에서 생성된 황산과 중금속은 주변지역의 토양, 지하수, 지표수의 산성화와 중금속오염을 야기한다. 또한 산화과정에서 생성된 황산이 절취사면을 따라 흐르면서 암반의 풍화를 촉진시키고 사면에 설치된 숯크리트 등의 구조물을 부식시켜 사면안정성을 저해한다. 따라서 굴착에 의하여 지표에 노출된 황철석의 산화과정, 산발생 정도, 중금속 용출에 대한 정량적 이해가 사면안정성 증진 및 구조물 부식 저감대책수립에 기초자료가 된다. 또한 암반산성배수 발생가능지역에서 사면절취에 따른 피해정도를 정확히 예측할 수 있다.



황철석의 산화반응속도는 산성배수 발생저감을 위한 대책공법의 적용시기, 산성배수에 의한 피해발생시기 등을 예측하는데 중요한 자료가 된다. 또한 인산처리에 의한 피막형성은 황철석의 산화과정에서 용출되는 철과 인산이 반응하여 철인산염의 피막을 형성한다. 따라서 황철석의 산화기작의 정확한 이해는 피막형성의 최적조건 도출의 필수 선행조건이 된다. 자연수(지표수, 지하수, 강우)는 다양한 종류의 이온을 함유하고 있는데 이러한 이온들이 황철석의 산화반응에 미치는 영향을 정량적

으로 이해함으로서 암반의 풍화, 환경오염, 사면구조물의 피해, 사면안정성, 산성배수 발생저감을 위한 대책공법의 수립에 중요한 자료가 된다.

2. 연구방법

가. 시료준비

페루산(Huanzala, Peru) 표준 황철석을 미국 Ward's Science사로부터 구입하여 파쇄한 후 미분기(pulverizer)를 이용하여 $63\mu\text{m}$ 이하의 입도를 가지는 분말화 하였다. 표준 황철석 분말은 표면의 산화물을 제거하기 위하여 1N HCl과 아세톤을 이용하여 세척하였다. 세척한 시료는 질소가스로 충전된 glove box에 보관하고 사용하였다.

나. 실험방법

$63\mu\text{m}$ 이하의 입도를 가지는 시료 20g과 3차 증류수 2L를 유리 비이커에 넣고 상온에서 대기과 접촉한 상태로 163시간 동안 교반하였다. 반응 중에 약 1시간 간격으로 10ml 현탁액을 채취하여 $0.45\mu\text{m}$ 여과막(membrane filter)을 이용하여 여과한 후 용액의 pH, 전기전도도(EC), 온도를 즉시 측정하고, 이온크로마토그래피(ion chromatography, DX-100, DIONEX Co.)를 이용하여 F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 를 측정하였다. 용액 중의 Fe^{2+} 는 비색법으로 측정하였으며, 총 Fe, Cd, Cu, Zn, Mn의 함량은 유도결합 플라즈마 원자방출분광기(ICP-AES, JY70PLUS, Jobin Yvon Co.)를 이용하여 측정하였다.

3. 연구결과

가. 반응속도 및 산화반응 기작

반응 초기 약 10시간 까지는 산화반응이 빠르게 진행되었으나 10시간이후에는 산화반응속도가 급격히 낮아졌다. 산화반응 초기에 용액의 pH는 5.8에서 3.5로 급격

히 낮아지다가 10시간이후부터 163시간까지 pH3 정도로 안정되었다(그림 1). 용액의 전기전도도(EC)도 pH변화와 같은 양상을 보여주었다(그림 2).

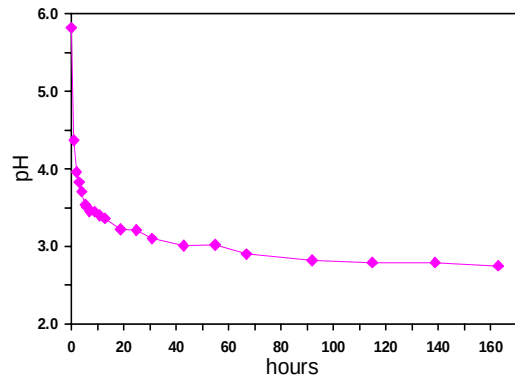


그림 1. 반응시간에 따른 pH 변화.

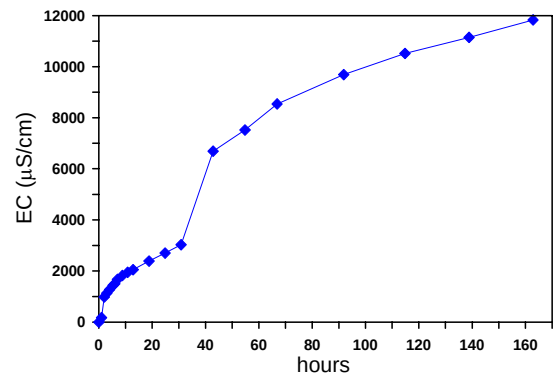


그림 2. 반응시간에 따른 EC의 변화.

황철석의 산화반응과정에서 미량으로 함유된 중금속(Pb, Zn)은 반응이 진행되면서 황철석의 산화용해에 의하여 지속적으로 용액 속으로 용출되어 나왔다(그림 3, 4). 이는 황철석 산화에 의하여 생성된 황산과 더불어 주변지역의 토양, 지표수, 지하수의 오염원이 된다.

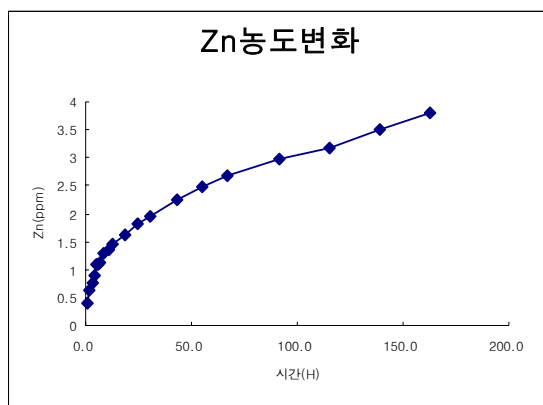


그림 3. 반응시간에 따른 Zn의 농도 변화.

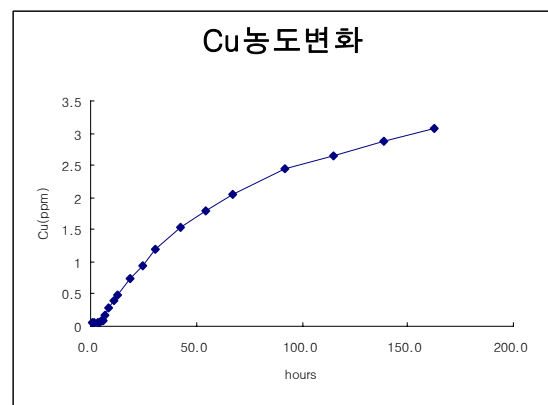


그림 4. 반응시간에 따른 Cu의 농도 변화.

황철석의 산화 산물인 SO_4^{2-} 와 Fe^{2+} 의 농도 또한 초기에 급격히 증가하다가 반응후기인 10시간 이후에는 증가속도가 둔화되었다(그림 5, 6).

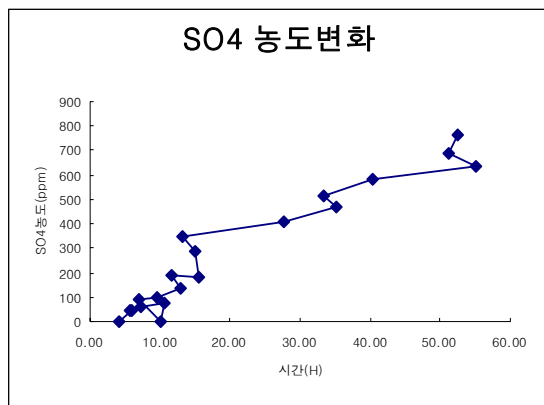


그림 5. 반응시간에 따른 SO_4^{2-} 농도 변화.

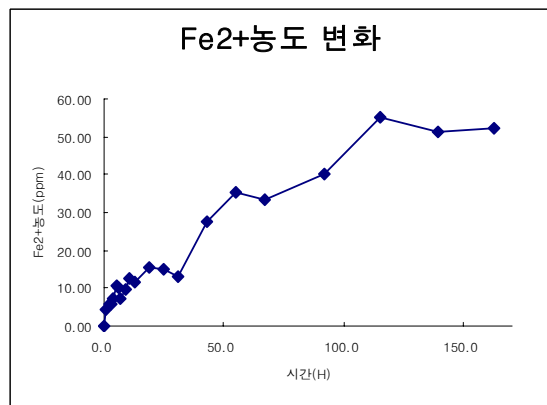


그림 6. 반응시간에 따른 Fe^{2+} 의 농도 변화.

반응시간의 경과에 따른 $\text{SO}_4^{2-}/\text{total Fe}$ 는 반응시간 10시간을 기점으로 0.038에서 0.009로 변하였다(그림 7). 화학반응의 stoichiometry 관점에서 FeS_2 가 용존산소와 반응하여 Fe와 SO_4^{2-} 가 용출되어 안정한 상태로 유지되면 용액내의 total Fe/ SO_4^{2-} 는 0.5를 유지하여 된다. 본 실험에서 나타난 결과는 0.009 - 0.038로 나타났는데 이는 황철석의 산화과정에 Fe이 먼저 용출된 다음에 SO_4^{2-} 가 용출됨을 의미한다. 열화적인 관점에서 고려하면 0.5보다 작은 값인 0.038은 산화철(Fe_2O_3) 침전물의 형성을 의미한다. 또한 0.038에서 0.009로 감소는 초기반응 후에 형성된 S-rich layer가 후기에 용해되고 반응초기에 형성된 S-rich layer는 용존산소가 FeS_2 의 표면에 접근하는 것을 차단하여 후기의 산화반응속도의 저감원인이 된 것으로 판단된다. 풍화된 황철석 단면은 표면으로부터 $\text{SO}_4 \gg \text{Fe}$ 층, $\text{SO}_4 > \text{Fe} > \text{FeS}_2$ 층, FeS_2 층으로 추정된다(그림 8).

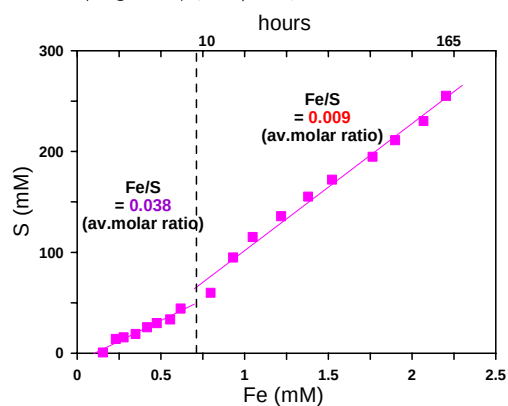


그림 7. 반응시간에 따른 Fe와 S의 농도 변화.

풍화된 황철석 단면모식도

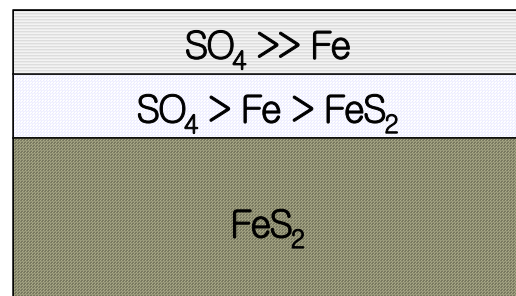


그림 8. 황철석의 풍화단면 모식도.

제 2절. 문헌조사를 통한 산성배수 발생가능지역 가능지역의 추출 및 현장 확인

1. 이론적 접근 방법 및 현장조사

절취사면의 암반산성배수의 근원물질인 황철석은 환원환경에서 퇴적된 퇴적물의 속성작용, 다량의 유황을 함유한 열수와 모암과의 반응, 열수로부터 직접침전에 의하여 생성되는 것으로 알려져 있다. 기존지질도와 토양도를 활용하면 전국에 산재해있는 퇴적암의 퇴적환경, 제3기 및 4기의 퇴적환경, 화산활동에 대한 정보를 얻을 수 있다. 퇴적환경과 화산활동에 대한 정보를 바탕으로 산성배수의 근원물질인 황철석을 많이 함유하고 있을 것으로 추정되는 암석 및 퇴적물의 전국적 분포 예상도를 작성하였다. 분포 예상도를 바탕으로 암반산성배수가 발생될 것으로 추정되는 암상을 가로지르는 형식으로 고속도로, 국도의 절취사면을 대상으로 현장조사를 실시하여 암반산성배수의 발생현황을 확인하였다. 암석유형별로 암석시료 21점과 사면배수의 채취가 가능한 지역에서 배수시료 9점을 채취하여 분석을 실시하였다.

2. 연구결과

문헌연구와 현장 확인조사 결과 건설공사과정에서 암반의 지표노출로 암반산성배수가 발생될 개연성이 있는 암석은 강원지역의 평안층군, 충청지역의 옥천층군, 경남과 전남지역의 중생대 백악기 화산암류, 포항지역의 제3기 퇴적암 및 화산암류로 밝혀졌다(그림 9). 열수변질을 받은 경기지역의 편마암과 경상도지역의 경상계 퇴적암이 국부적으로 암반산성배수를 발생시킬 개연성이 있는 것으로 조사되었다. 또한 휴폐광산이 많이 분포하는 주요 금속광화대 지역도 산성배수가 발생될 개연성이 높은 것으로 조사되었다(그림 10).

일부지역에서는 절취사면에서 발생하는 암반산성배수로 인하여 사면안정성 확보, 환경오염 부하의 저감이 건설현장의 현안문제로 대두되고 있다. 충북의 고속도로건설공사 및 국도확장공사 현장에서는 지역주민들에 의하여 환경오염에 대한 민원제기로 공사가 일시 중단되는 사태가 빚어지기도 하였다.

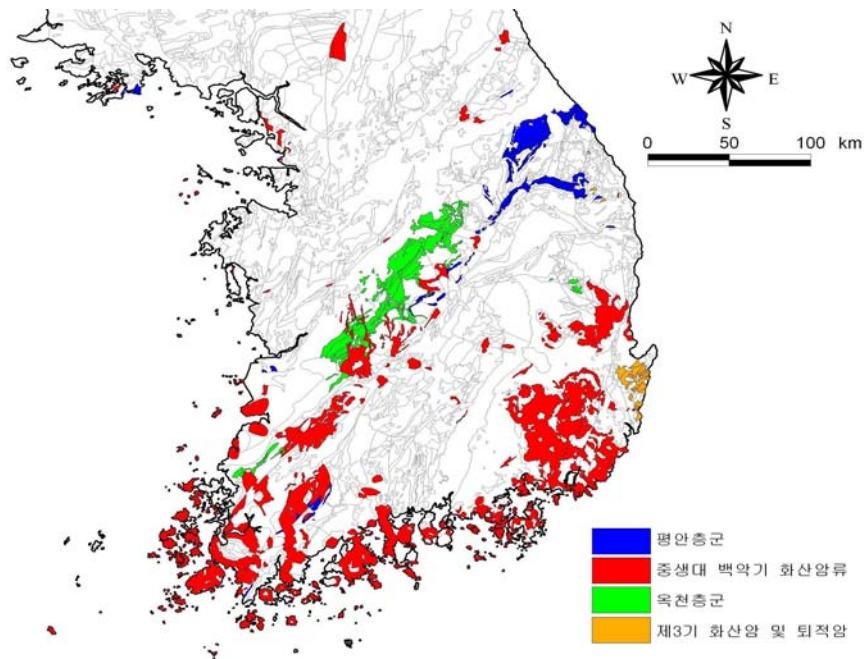


그림 9. 산성암반배수 발생개연성이 있는 암석의 분포지역

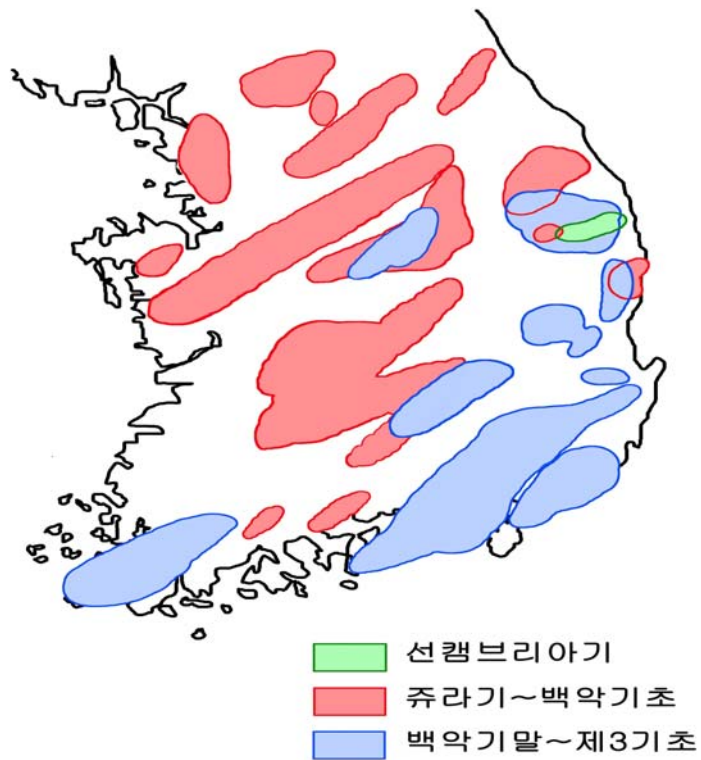


그림 10. 우리나라 주요 금속 광화대.

암반산성배수가 발생하는 절취사면에서 채취한 사면배수의 분석결과 총 9지점 중에서 6지점의 수질이 환경부 수질기준치를 초과하였다(표 4). 배수의 pH와 Fe, Al, Mn의 농도가 가장 심각한 환경오염문제인 것으로 밝혀졌으며 일부지점의 산성배수에서는 Pb와 Zn이 수질기준치를 초과하여 절취사면으로부터 환경오염부하가 향후 환경문제로 대두될 개연성이 높다.

표 4. 사면배수의 수질. Std*: 환경부 생활용수 기준

Sample	T. (°C)	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca	K	Mg	Na
				(mg/ℓ)							
SR	15.8	2.83	1618.0	0.802	4.674	3.298	947.26	70.8	2.15	29.20	4.34
CHG	19.1	3.12	2640.0	5.820	12.160	0	2752.88	175.0	18.70	140.00	39.20
YS	10.2	3.21	2040.0	17.268	7.888	2.636	1611.83	129.0	6.92	53.60	12.40
HK	24.7	3.68	161.5	0.093	2.521	2.416	67.46	2.06	0.47	3.71	2.89
KB	24.7	3.73	593.0	1.010	7.948	0.687	384.22	38.7	3.46	20.10	6.84
HB	16.3	5.68	62.9	0.014	4.735	6.354	25.15	3.86	3.40	1.61	2.51
IW	24.5	6.68	699.0	0.189	2.823	0	133.30	12.7	3.89	33.00	6.45
KP	16.9	7.14	984.0	0.528	30.284	1.856	505.08	74.4	2.05	10.30	39.50
CP	24.7	8.98	157.7	0.197	9.173	0.601	1.99	68.6	5.36	9.28	20.50
Std.*		5.8-8.5		250							

Sample	Si (mg/ℓ)	Al	Ba	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
		(μg/ℓ)								
SR	26.10	741.0	4.14	567.0	489.00	5710.0	2970.0	1550.0	115.00	1270.0
CHG	44.10	0	0	320.0	10.50	26500.0	7550.0	1260.0	40.80	3450.0
YS	31.50	969.0	14.1	403.0	35.70	48500.0	26200.0	110.0	74.50	1150.0
HK	7.04	1110.0	10.1	35.7	16.20	671.0	36.2	93.3	5.58	30.5
KB	21.40	1620.0	25.0	235.0	66.50	373.0	1310.0	688.0	44.80	956.0
HB	5.23	98.2	26.7	7.9	1.58	18.9	65.3	13.2	1.76	10.7
IW	9.14	4.9	32.0	2.8	2.03	425.0	1450.0	4.6	7.45	7.6
KP	7.86	113.0	40.5	0	0	0.9	361.0	8.8	3.75	1.2
CP	12.30	8.2	53.9	4.1	0.58	18.9	3140.0	1.4	4.83	0.5
Std.*		300				300	300		100	1500

제 3절. 암석의 암반산성배수 발생개연성 및 위해도 평가

1. 이론적 접근 방법

황철석이 지하에서 대기와 차단되어 존재하면 안정된 상태로 존재하지만 도로건설 등 토목공사과정에서 지표에 노출되면 용존산소와 반응하여 산화되면 산성배수를 생성하고 환경오염과 사면안정성의 저해와 같은 문제를 야기한다. 따라서 도로건설 등 토목건설사업의 조사단계에서 암반의 산성배수 발생 개연성을 평가하여 산성배수의 발생에 대한 적절한 대책공법의 수립이 필요하다. 호주, 캐나다 등에서는 산성배수에 의한 피해를 많이 경험하여 암석에 대한 평가방법이 확립되어 건설공사의 조사단계에서 암석의 산성배수 발생 개연성에 대한 적절한 평가와 대책이 시행되고 있다. 우리나라에서는 암반산성배수에 대한 평가가 시행된 적이 없으며 현재 일부 공사현장에서 산성배수에 의한 문제가 야기되고 있으나 실체에 대한 정확한 이해가 부족하여 적절한 대책이 이루어지지 않고 있다. 따라서 외국에서 확립된 평가방법을 도입하여 우리나라의 암반에 대한 산성배수 발생 개연성에 대하여 평가를 실시하고 적용성을 검토하였다.

암반산성배수는 암석의 황철석 함량과 산에 대한 중화능에 좌우된다. 암석의 유황 함량을 측정하여 산발생능을 계산하고 암석에 의한 산의 소모량을 측정하여 산에 대한 중화능을 계산하였다. 산발생능과 중화능의 차이를 계산하여 암석의 산성배수 발생개연성을 판단하였다.

2. 연구 방법

가. 시료 준비

산성배수의 발생이 육안으로 확인할 수 있거나, 암석 내에 황철석이 포함되어 있어 산성배수가 발생할 개연성이 있는 지역을 중심으로 전국의 건설현장 절취사면에서 23점의 암석시료를 채취하였다. 암석시료는 파쇄기(crusher)를 이용하여 수cm 이하로 잘게 부수고 고르게 섞은 후 미분기로(pulverizer)로 200mesh 이하로 분말화하

었다.

나. 유황함량 및 광물조성 분석

황철석의 함량은 산발생능력과 구성광물의 종류 및 함유량은 암석의 중화능과 밀접한 관계가 있다. 광물조성과 황철석 함량을 분석하기 위하여 분말시료에 무게비 5%의 산화알루미늄(Al_2O_3)을 첨가한 후 X-선 회절분석을 실시하였다. X-선 회절 분석 결과를 이용한 황철석 함량 계산은 Matrix-flushing 방법(Chung, 1974)을 이용하였다. 분말시료의 유황함량은 황분석기(Sulfur determinator, SC-132, LECO Co.)를 이용하여 측정하였다.

다. 산발생능 평가

암석의 산발생능은 1) 최대산발생능력(maximum potential acidity, MPA), 2) 산중화능력(neutralization potential, NP), 3) 순산발생능력(net acid production, NAP) 혹은 NP/MPA, 4) 순산발생량(net acid generation, NAG)으로 구분하여 측정하였다. 최대산발생능력은 $\text{MPA}(\text{kg CaCO}_3/\text{t}) = \text{total S}(\%) * 31.213$ 식을 이용하여 계산하였다. 산중화능력은 1N 표준 HCl을 이용하여 시료 내에 함유된 산 중화물질을 모두 소모시킨 후 남은 HCl을 0.1 혹은 0.5N 표준 NaOH로 적정하여 측정하였다. 순산발생량은 분말시료 2.5g을 500ml 플라스크에 넣고 15% H_2O_2 를 조금씩 가하여 250ml까지 첨가한 후 상온에서 기포발생이 멈출 때까지 반응시켰다. 상온에서 기포발생이 멈춘 후 90℃로 가열하여 잔여 H_2O_2 를 제거하였다. 냉각 후 증류수로 250ml가 되도록 부피를 조정한 후 pH를 기록하였다. 이를 표준 NaOH용액을 이용하여 pH4.5까지 적정한 후 $\text{NAG}(\text{kg H}_2\text{SO}_4/\text{t}) = (49 * V * M) / W$ 식을 이용하여 계산하였다. V는 적정에 사용된 NaOH 량(ml), M은 NaOH의 농도(mole/L), W는 시료의 무게이다.

3. 연구 결과

가. 유황함량 및 광물조성

암석시료의 유황함량은 0 - 11.27%를 나타내었다. 황분석기를 이용하여 유황함량을 측정하여 황철석으로 환산한 방법과 XRD를 이용한 황철석의 정량법을 동시에 이용하여 암석내의 황철석 함량을 측정한 결과(그림 11)는 높은 상관관계를 보여주었다($r^2 = 0.88$). 유황분석기를 이용한 암석의 유황함량 분석은 상대적으로 많은 시간과 노력이 필요하다. 반면 XRD를 이용한 황철석의 정량법은 유황분석법에 비하여 상대적으로 경제적인 방법이다. 따라서 XRD법을 전통적으로 사용하여온 유황분석을 대체할 수 있다고 판단된다.

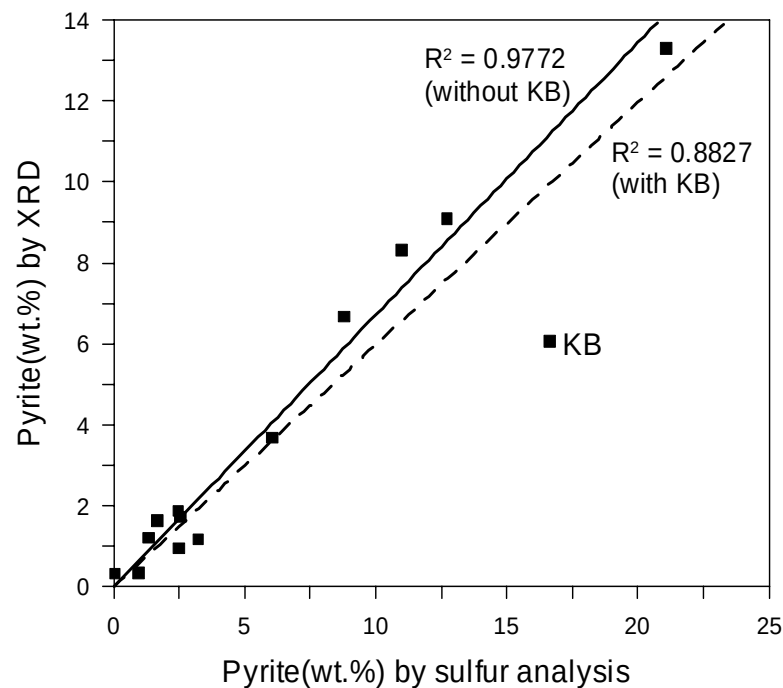


그림 11. 유황함량분석을 이용한 황철석 함량과 XRD를 이용한 황철석 함량의 상관관계.

XRD분석 결과 암석의 주구성광물은 석영, 운모, 장석류, 황철석 등이며 암석의 종류에 따라 일부 시료에서 스펙타이트, 카올리나이트, 납석, 전기석, 감람석이 포함되어 있다(표 5). 각 광물 들은 산에 대한 중화능력이 상이하며 또한 광물의 함량비는 암석의 중화능의 결정요소가 된다. 탄산염광물과 장석류를 많이 함유한 암석이 석영을 많이 함유한 암석에 비해 산에 대한 중화능력이 높다(표 6).

표 5. 시료의 광물함량

Sample	Qtz	Mica	Pl	K-feld	Py	Smec	Ver	Chl	Pyro	Kaol	Tour	Cal	Gyp	Amp
(wt.%)														
KR	63.6	1.4	5.6	2.9	13.3			10.2						
YH	89.0	10.5		2.0	9.1						6.0			
YS	41.1				8.3					40.1				
YJ	92.3				6.7							2.3		
KB	30.6	6.6	6.9		6.1			31.0						
YW	9.1	7.5		2.1	3.7			23.8	19.3					
CH	11.3		3.7	2.4	1.9	31.1					1.3			0.7
CH3	13.1	1.9	19.9	10.4	1.7	30.5					1.9			2.3
BS	3.9		5.5		1.6	28.9								
HK	15.9	35.1	5.8		1.2			33.9						
HB	63.6	13.1	6.7		1.2			7.9						
BK	44.0	0.4	14.0	17.8	1.0		4.0				2.8			
KK	12.5		5.0		0.4	12.2					2.0			
CHG	27.7		2.0	3.4	0.3									
DE	83.3	8.2	5.2								6.9			
IW	34.8	21.8	9.0								3.6			
YA	30.7	2.4	33.4			45.5								
SR	53.9	17.5						18.3						
TB	36.6	18.3		3.4					42.5	7.3				
CP	50.7	1.9	21.8	17.0										
KP	12.8	0.9	7.9	6.4				1.4						49.2

표 6. 구성광물의 산에 대한 중화능력.

Mineral group	Typical minerals	Relative reactivity at pH 5
Dissolving	Calcite, aragonite, dolomite, magnesite, brucite	1.00
Fast weathering	Anorthite, nepheline, forsterite, olivine, garnet, jadeite, leucite, diopside, wollastonite	0.40
Intermediate weathering	Sorosilicates, pyroxenes, amphiboles, phyllosilicates	0.02
Slow weathering	Plagioclase feldspars	0.01
Very slow weathering	K-feldspars, muscovite	0.01
Inert	Quartz, rutile, zircon	0.004

나. 산성배수 발생 개연성 및 위해도

최대산발생능력은 최소 0.03 kg CaCO₃/t, 최대 351.77kg CaCO₃/t로 나타났다. 산중화능력은 -14.85 ~ +86.25 kg CaCO₃/t 범위를 나타내었다(표 7). 산중화능력이 음(-)의 값이면 시료가 산에 대한 중화능력이 전혀 없음을 의미한다. CHG시료의 경우 산에 대한 중화능력이 전혀 없으나 산발생능력 또한 없어 암반산성배수를 발생시킬 개연성이 없다. 반면 YS시료는 산에 대한 중화능력이 낮으면서 유황함량이 높아 산성암반배수가 발생될 개연성이 높아 YS시료가 분포하는 지역에서 지반절취 시 산성배수에 대한 대책수립이 요구된다. 일반적으로 (1) 산중화능력/최대산발생능력 값이 1 이하 이면 산성배수가 발생될 개연성이 높으며 대책이 요구된다. (2) $1 < \text{산중화능력/최대산발생능력} < 2$ 이면 산성배수가 발생될 개연성이 어느 정도 있어 주의가 필요한 경우이다. (3) $2 < \text{산중화능력/최대산발생능력} < 4$ 이면 산성배수가 발생될 개연성이 희박하다. 반면 (4) 산중화능력/최대산발생능력 > 4 이면 알카리암반배수가 발생될 개연성이 있다. 산성배수가 발생될 개연성이 높아 대책수립이 요구되는 시료가 16점, 주의가 요구되는 시료가 1점, 산성배수가 발생될 개연성이 전혀 없는 시료가 4점으로 분류되었다.

표 7. 암석의 산발생 능력과 중화 능력.

Sample	Total S(%)	MPA	NP	NAPP	NAG	NP/MPA	
		(kg CaCO ₃ /t)			(kg H ₂ SO ₄ /t)		
YA	0.09	2.69	-14.9	17.54	1.893	-5.53	
CHG	0.03	0.82	-1.7	2.52	0.000	-2.08	
KK	0.50	15.69	-7.2	22.89	16.844	-0.46	
HK	0.71	22.27	-1.6	23.87	10.686	-0.07	
YW	3.23	100.66	-4.8	105.46	62.093	-0.05	
YH	6.80	212.31	-8.9	221.16	107.839	-0.04	
YS	5.88	183.38	-6.4	189.78	142.139	-0.03	
BS	8.89	277.55	4.3	273.25	104.891	0.02	<1
TB	0.06	1.87	0.4	1.47	0.000	0.21	
BK	1.33	41.62	9.2	32.42	13.671	0.22	
KR	11.27	351.77	86.3	265.52	3.348	0.25	
HB	1.73	53.89	13.8	40.09	19.467	0.26	
CH	1.32	41.20	10.9	30.30	12.370	0.26	
DE	0.28	8.66	3.5	5.21	1.068	0.40	
YJ	4.70	146.79	62.1	84.69	75.550	0.42	
CH3	1.36	42.45	29.8	12.65	10.004	0.70	
BS	0.90	28.06	33.4	-5.34	4.000	1.19	1-2
KP	0.31	9.54	26.8	-17.26	0.000	2.81	>2
SR	0.07	2.22	11.2	-8.93	0.000	5.03	
IW	0.08	2.38	24.1	-21.72	0.000	10.14	>4
CP	0.00	0.03	9.2	-9.12	0.000	312.97	

또한 NAG를 이용하여 암석의 산성배수의 발생 개연성의 분류를 살펴보면 NAG가 4 이하이면서 NAPP가 0 이상이면 산성배수가 발생될 개연성이 있는 암석으로 NAG가 4 이상이면서 NAPP가 0 이하 이면 산성배수가 발생될 개연성이 높은 암석으로 분류된다. 총 23점 시료 중 17점이 산성배수가 발생될 개연성이 있는 암석으로 6개 시료는 산성배수가 발생될 개연성이 없는 것으로 분류되었다(그림 12).

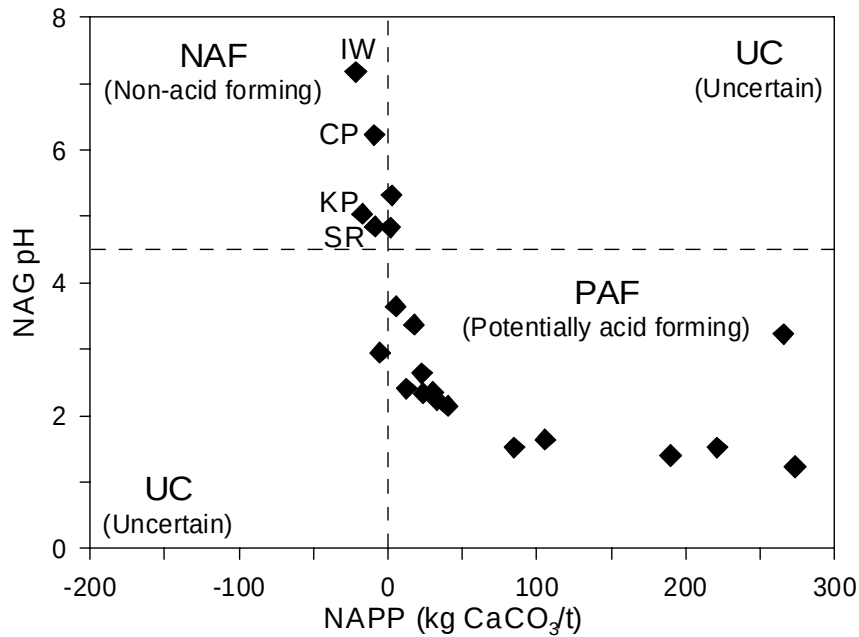


그림 12. NAPP와 NAG를 이용한 암석의 산성배수 발생 개연성평가.

제 4 절 산성배수가 발생하는 절취사면의 현황조사

1. 이론적 접근방법

최근 들어 사회기반시설의 확충으로 국토의 동서 및 남북방향으로 새로운 도로의 건설, 기존도로의 확장 및 선형변경 사업이 활발해지면서 황화광물을 포함하고 있는 지층을 절토하게 되고, 이로 인하여 산성암반배수가 발생하는 건설현장이 급증하고 있다. 절취사면에서 발생하는 산성배수는 주변지역의 환경오염뿐만 아니라 숯크리트, 앵커 등 사면구조물의 안정성에도 악영향을 미치고 있어 환경친화적인 건설사업에 문제를 야기하고 있다. 그러나 대부분의 토목 및 택지개발 현장에서 암반 산성배수에 의한 주변지역의 환경오염과 사면안정성에 미치는 영향에 대한 인식이 부족하고, 근본적으로 산성암반배수의 발생저감을 위한 적절한 대책공법이 있지 않아 주로 절취사면에 물의 접촉을 최소화하기 위한 숯크리트나 배수구를 설치하여 산성암반배수의 발생을 최소화하고 있는 실정이다. 특히 숯크리트공법은 암반사면

을 대기와 강우로부터 차단하여 침식을 방지할 목적으로 시공하는 것으로 암반에 균열이 적고 용수가 거의 없는 곳에 적합한 공법이다. 그러나 우리나라의 경우 산성암반배수가 발생하는 대부분 숏크리트공법으로 시공하고 있으며 산성배수에 의한 사면구조물의 부식 등 심각한 영향을 미치고 있다. 또한 산성암반배수가 발생되고 있는 지역에 대한 정보가 전무한 실정이다. 따라서 우리나라 도로건설현장의 절취사면에서 발생하고 있는 산성암반배수의 실태와 이로 인한 사면구조물의 피해현황을 파악하는 것이 향후 대책 수립에 중요하다.

2. 조사 방법

암반산성배수 발생의 근원물질인 황철석의 생성조건, 지질의 특성, 토양분류 등을 검토하여 산성암반배수가 발생시킬 개연성이 있는 암석의 분포지역을 추출하였다. 암반산성배수가 발생할 개연성이 있는 지역을 중심으로 고속도로와 국도의 사면, 건설현장의 사면에서 현장조사를 실시하였다. 현장조사 항목으로는 크게 지질, 지형, 토질, 환경요인으로 분류했다. 지형항목으로는 사면폭, 사면높이, 사면경사, 사면방위, 모양, 표면형태, 단면선 형태로 세분하고, 지질 및 토질요인으로는 지표상황, 표토두께, 지반상태, 암반균열간격, 단층 및 폐쇄대 유무, 사면과 불연속면의 경사관계에 대하여 조사 기록하였다. 환경요인으로는 대책공법과 시공 후 경과시간, 붕괴이력, 붕괴장소, 용수상태, 대책공 이상유무, 대책공 상부의 상태, 사면상부의 토지이용 상황에 대하여 관찰 기록하였으며 현장 스케치와 사진을 첨부하였다.

3. 조사 결과

절취사면에서 황철석의 산화에 의해 발생하는 산성암반배수는 강산성이며 높은 농도의 중금속을 함유하고 있다. 그 이유는 절취사면에 흘러나오는 지하수와 강수가 황철석의 산화에 필요한 산소를 꾸준히 공급해주고 있으며 산화반응에 필요한 시간도 충분히 주어지기 때문이다. 따라서 절취사면에서 발생하는 강산성의 배수는 부식성이 강해 암반의 풍화를 가속화하고, 사면구조물의 숏크리트, 그라우팅 주입제, 앵커, 록볼트 등을 부식시켜 노후화를 촉진시킨다. 또한 강산성의 사면배수는 사면녹화에 사용되는 피복식물의 발아 및 성장에도 부정적인 영향을 미치고 있다.

그 외에도 산성배수가 주변지역으로 유출되어 토양, 지표수, 지하수의 오염과 경관을 훼손시키고 있다.

가. 절취사면의 불안정성

황철석을 다량 함유하고 있는 지층을 절취할 경우 파쇄대나 절리면을 따라 황철석이 쉽게 산화되어 슬라이드면을 형성하게 되고 이로 인하여 절취사면이 불안정하게 된다(그림 13, 14). 절리면을 따라 생성된 산성배수는 절리면의 풍화를 촉진시켜 절리면의 폭을 확장시킨다. 확장된 절리면의 폭은 절리면을 따라 강수와 지하수의 유입이 촉진되고 암석블록의 붕괴를 유발한다. 이러한 현상은 특히 지층의 구조운동과 수반되어 열수에 의하여 황철석이 생성된 지역에서 특히 많이 관찰된다.



그림 13. 천매암 절리면.



그림 14. 불안정한 사면.

단순황화광물계(simple sulfide system)과 퇴적환경에서 생성된 황철석은 암석 내에 골고루 분포하며 미세한 입자로 존재하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경우에는 황철석의 산화가 절취사면의 표면에서 집중적으로 발생하는 경향이 있으며 황철석의 입자가 작고 표면적이 커서 상대적으로 풍화가 빨리 진행되는 경향이 있다. 이러한 사면에서는 암석이 절리면을 따라 붕괴되는 것보다 지하수 혹은 강수의 흐름이 집중되는 부분에서 풍화가 급속히 진행되어 사면이 불안정해지는 경향이 있다(그림 15, 16).



그림 15. 황철석의 산화에 의한
암석풍화의 가속화.



그림 16. 사면암석 풍화.

나. 사면구조물(쇼크리트 및 앵커) 부식

암반산성배수를 발생시키는 암석 중에는 특히 탄질셰일, 천매암 등 절리가 많이 발달된 변성암이 많은데 절리를 따라 물의 유입이 많다. 이러한 물의 유입에 의하여 야기될 수 있는 침식, 풍화를 방지하여 사면안정성을 증진시키기 위하여 숏크리트 공법을 널리 적용하고 있다. 특히 산성암반배수가 발생하는 절취사면에 알칼리성 시멘트 몰타르로 함황철석 암석을 피복하고 대기노출을 차단하여 황철석의 산화에 의한 산성암반배수의 발생을 저감하기 위하여 숏크리트공법을 시공하고 있다. 그러나 이 공법은 배수가 발생하고 균열이 발달한 절취사면에는 콘크리트피막과 암반이 밀착되어 일체화되기 어렵기 때문에 미세공간이 발생하게 되고 지하수와 공기의 유입으로 용존산소가 피복되지 않은 황철석과 반응하여 사면처리 후에도 산성암반배수가 지속적으로 발생하는 문제점이 있다. 사면에서 발생된 산성배수가 배수공 혹은 틈을 따라 표면으로 흐를 경우 알칼리성 콘크리트와 반응하여 콘크리트피막의 표면을 용해시켜 부식시키게 된다(그림 17). 산성배수가 접촉면을 따라 흐르게 되면 콘크리트피막의 암반접촉면을 부식시켜 콘크리트피막과 암반사이에 배면공동을 형성한다(그림 18). 표면부식, 배면공동의 형성 등은 콘크리트피막의 노후화를 촉진하고 결국 피막의 붕괴를 유발한다. 또한 부식성이 강한 산성배수는 사면안정성 보강을 위해 설치한 록볼트, 앵커 등의 부식을 유발한다.

현장조사 결과 산성암반배수가 발생하는 많은 사면에 숏크리트공법이 적용되어 있

었으며 대부분의 콘크리트피막과 앵커는 심한 부식현상을 나타냈다(그림 19, 20). 또한 산성배수로부터 붉은색 산화철과 흰색의 수산화알루미늄 혹은 황산알루미늄의 침전현상이 관찰되었다.



그림 17. 콘크리트피막의 표면부식.



그림 18. 배면공동의 형성.



그림 19. 앵커의 부식.



그림 20. 사면구조물의 부식.

다. 식생공 적용실패

식생공은 잔디 등과 같은 식물로 사면을 피복하여 우수에 의한 침식 및 토사 유출을 방지하고, 표면온도 변화를 완화하며 식물 뿌리가 표토를 결박하여 동결에 의한 붕괴를 억제하는 작용을 한다. 사면녹화로 주변의 자연환경과 조화를 이룰 수 있고, 경제성이 우수하여 흙사면뿐만 아니라 암반사면에도 널리 시공하고 있다. 산성

배수가 발생하는 사면에 식생공을 적용하면 살포된 점토가 산성화되고 토양의 산성화로 식물의 발아 및 성장에 심각한 장애가 발생하여 실패하는 사례가 많다(그림 21, 22). 최근 포항지역에 분포하는 제3기 퇴적층의 산성배수에 의한 식생공의 실패, 주변지역의 농작물 피해, 환경오염이 문제가 되어 일부지역에서 산성배수의 중화를 위하여 생석회를 살포한 후 식생공을 적용하는 사례가 늘어나고 있다(그림 23, 24). 생석회를 이용한 산성배수의 중화는 근원적인 대책이 되지 못하고 있으며 생석회의 사용에도 불구하고 식생공의 적용이 빈번히 실패하는 경우가 많이 발생하고 있다. 현장조사에서도 식생공 적용의 실패사례가 관찰되었으며 산성배수의 발생을 근원적으로 저감하는 공법의 적용이 선행된 후에 식생공의 적용이 바람직하다고 판단된다.



그림 21. 산성배수에 의한 식생공 적용의 실패사례.



그림 22. 산성배수에 의한 발아 부진.



그림 23. 생석회 살포 후 식생공의 적용 사례.



그림 24. 생석회 살포 후 식생공이 적용된 사면.

라. 침전물에 의한 경관훼손

황철석의 산화에 의하여 생성된 산성배수는 고농도의 철을 함유한다. 또한 강산성인 배수는 aluminosilicate 광물을 용해시켜 일반적으로 산성배수는 고농도의 알루미늄을 함유한다. 산성배수에 함유된 철과 알루미늄은 pH가 3이상이 되면 산화철, 수산화철, 수산화알루미늄, 황산알루미늄과 같은 광물을 사면에 침전시킨다. 이러한 침전물은 사면의 경관을 훼손하고 농경지로 유입되면 농작물의 뿌리 등을 피복하여 성장장애를 유발한다. 현장조사 결과 암반산성배수가 발생하는 모든 사면에서 붉은색의 산화철과 수산화철, 흰색의 수산화알루미늄과 황산알루미늄의 침전현상을 관찰하였다(그림 25). 침전물에 의한 경관훼손은 환경친화적인 건설사업 수행의 방해요소가 될 수 있다(그림 26).



그림 25. 슛크리트 표면의 침전물에 의한 경관훼손.



그림 26. 절취사면의 침전물에 의한 경관훼손.

마. 환경오염 부하

황철석은 미량의 중금속을 포함하는데 황철석의 산화/용해과정에 중금속이 용출되어 주변지역으로 유출되어 토양, 지하수, 지표수를 중금속으로 오염시키고 산성화를 유발한다(그림 27, 28). 현장조사 시에 채취한 배수를 분석한 결과 9지점 중 pH가 6지점, Al이 4지점, Fe가 6지점, Mn이 5지점, Pb와 Zn이 각각 1지점 씩 환경기준치를 초과하였다.



그림 27. 사면으로부터 중금속을 함유한 배수의 유출.



그림 28. 건설현장 폐석적치장으로부터 산성배수의 유출.

바. 아스콘 및 콘크리트 노후화촉진

건설현장에서 굴착된 암석은 물성을 측정하여 적합할 경우 선별파쇄하여 골재로 사용하는 경우가 흔하다. 황철석을 많이 함유한 골재를 콘크리트 혹은 아스콘에 사용한 경우 콘크리트 혹은 아스콘 표면에 황철석이 노출되면 우수와 반응하여 산성 배수를 생성하게 된다. 황철석의 산화에 의하여 생성된 산성배수는 콘크리트와 아스콘을 부식시켜 노후화를 촉진한다. 현장조사결과 산성배수를 발생시키는 암석이 분포하는 지역의 도로노면에서 황철석의 산화에 의한 아스콘의 노후화와 붉은색의 착색을 흔히 관찰할 수 있었다(그림 29).



그림 29. 황철석 산화에 의한 아스콘 노후화.

사. 성토재로 활용에 따른 환경오염

일반적으로 도로건설 설계 시에 굴착량과 성토량을 같게하여 건설비용을 절감하고자하는 경우가 많다. 산성배수를 발생시키는 암석이 분포하는 지역에서 도로건설은 산성배수를 발생시키는 암석을 성토재로서의 활용이 불가피하다. 특히 산성배수에 대한 적절한 대책을 수립하지 않고 산성배수를 발생시키는 암석을 성토재로 사용하는 경우 성토층으로부터 발생배수가 주변지역으로 유입되어 환경오염과 농경지 피해를 발생시키는 사례가 본 연구에서 조사되었다(그림 30, 31).



그림 30. 성토층으로부터 발생된 산성 배수.



그림 31. 성토층으로부터 발생된 산성 배수에 의한 지표수 오염.

제 5절. 황철석의 산화가 암석의 물성에 미치는 영향

1. 이론적 접근방법

암석의 풍화는 물리적 풍화와 화학적 풍화로 대별된다. 물리적 풍화는 압력, 온도 등의 변화에 의하여 암석이 작은 크기로 부서지는 것을 의미한다. 화학적 풍화는 수소이온(H^+)을 소모하여 조암광물을 용해하고 2차광물의 생성과 이온의 용출로 정의할 수 있다. 암석의 풍화과정에 공극이 증가하고 미립자의 2차 광물이 생성되는데, 공극의 증가와 미립자의 2차 광물은 암석의 물리적 특성인 강도를 저하시켜 암반사면의 안정성을 저해한다. 황철석의 산화과정에서 생성된 황산은 사면배수를 산성화시키고 산성사면배수가 사면을 따라 배수되면서 암석의 풍화를 가속화한다.

사면에서 암석 풍화속도의 증가는 사면의 안정성이 저해되고 사면붕괴에 의한 안전사고를 유발할 개연성이 높다. 또한 사면 암석의 풍화속도의 증가는 사면안정성 확보와 안전사고의 방지를 위한 사면관리 비용의 증가를 유발한다. 따라서 사면에 노출된 황철석의 산화가 암석의 풍화에 미치는 영향을 정량적 이해는 설계와 사후 관리의 기본 자료가 된다.

2. 실험 방법

가. 암석 시료

방수로 공사현장에서 하나의 호상흑운모편마암 암체로부터 황철석의 함량이 다른 세 그룹의 시료를 채취하였다. 채취된 암석의 일부를 분말화($< 63\mu\text{m}$)하여 광물조성과 황철석 함량을 측정하였다. 풍화시험을 위해 D32*L60mm 실린더형 공시체로 성형하였다. 공시체 성형 시 암석의 물리적, 공학적 특성의 이방성을 최소화하기 위해 편리방향에 직각을 유지하도록 하였다(그림 32).

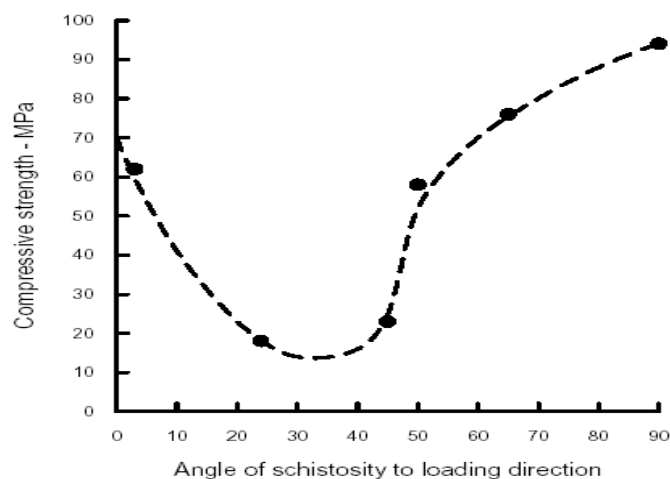


그림 32. 압축강도와 loading 방향의 상관관계.

각 그룹의 공시체는 황철석의 함량을 제외하고 유사한 광물조성을 가지고 있었다 (그림 33). XRD 광물정량 결과에 의하면 A 그룹은 0%, B 그룹은 3.1%, C 그룹

은 5.7%의 황철석 함량을 가지고 있었다. A 그룹과 B 그룹은 C 그룹에 비하여 상대적으로 조석이 치밀하였으며 C 그룹은 미세하게 발달된 틈새를 따라 황철석이 존재하였다(그림 34). P파의 속도는 $B > A > C$ 순이며 흡수율은 $C > A > B$ 순으로 나타났다. 풍화시험전의 일축압축강도는 A 그룹이 가장 높았으며 B 그룹과 C 그룹은 유사한 값을 나타내었다.

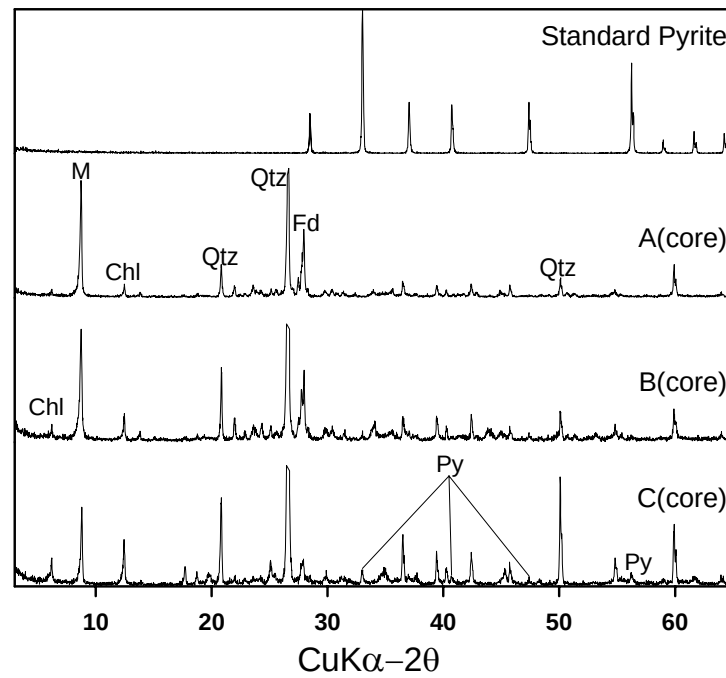


그림 33. 공시체의 광물조성.

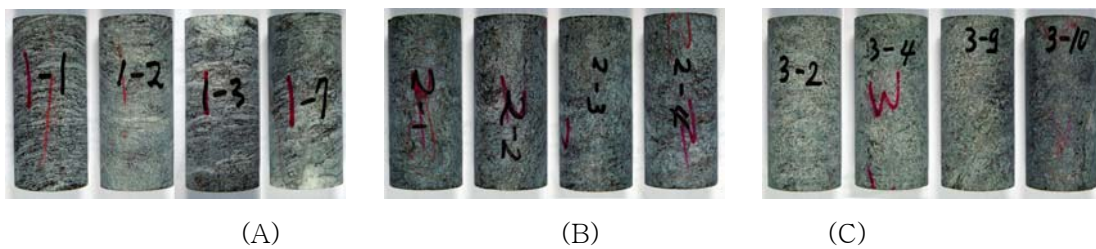


그림 34. 풍화시험 전 암석 공시체.

나. 풍화시험

각 그룹별로 공시체 4개를 선정하여 하나의 이중 속실판 추출기(double soxhlet extractor)에 2개씩 넣고 1달간 풍화시험을 하였다. 이중 속실판 장치는 공시체의 상부와 하부가 시간차를 두고 증류수에 잠기는 것을 방지하기 위하여 단번에 증류수에 의한 씻김이 일어나도록 고안되었다(그림 35). 풍화시험 동안 주기적으로 (2, 3, 4, 6, 9, 13, 22, 29일) 배수시료를 채취하여 0.45 μ m 여과막을 이용하여 거른 후 pH, EC, 양이온, 음이온, 중금속을 측정하였다. 1달간의 풍화시험 후 침전물의 조성을 XRD를 이용하여 분석하였다. 침전물과 풍화단면을 전자현미경(SEM-EDX)을 이용하여 관찰하였다.



그림 35. 속실판 암석풍화 시험장치.

다. 암석의 물성 측정

황철석의 산화가 암석의 풍화에 미치는 영향과 그에 따른 암석의 물성변화를 파악하기 위하여 풍화시험전과 후에 공시체의 물리적 특성인 흡수율, P파와 S파의 속도, 일축압축강도를 측정하였다.

3. 연구 결과

가. 암석 풍화에 의한 배수의 수질변화

황화광물을 제외한 일반광물은 지표환경에서 풍화과정을 받게 되면 수소이온을 소모하고 상당량의 양이온과 음이온은 지표수와 지하수로 용출되고 잔류이온들은 침전되어 점토광물, 산화철과 같은 이차광물을 형성한다. 반면 황철석은 지표에서 풍화가 진행되면 산화되어 황산과 산화철을 생성하게 된다. 생성된 황산은 다른 조암광물들의 용해를 촉진하여 풍화를 가속화하고 미량으로 함유된 중금속이 산화과정에 용출되어 지표수와 지하수로 유입되고 수질오염을 야기한다.

본 연구에서 풍화시험에 사용된 시료 중에 A 그룹은 황철석이 함유되어 있지 않아 풍화가 진행되면서 배수의 pH가 지속적으로 상승하는 현상을 보여주었다(그림 36). B 그룹은 상당량의 황철석이 암석에 함유되어 있으나 암석의 조직이 치밀하여 공시체 표면에 노출된 황철석만 산화되었다. 따라서 풍화시험 초기인 일주일간 배수의 pH가 낮아지다가 중기 및 후기에는 산화에 의한 황산의 생성보다 다른 조암광물들의 풍화과정에 소모되는 수소이온의 양이 상대적으로 많아 배수의 pH가 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다. C 그룹은 공시체 중에 황철석의 함량이 가장 많고 황철석이 암석의 미세한 틈을 따라 존재함으로 공시체에 함유되어 있던 황철석이 실험기간 중에 지속적으로 산화되었다. C 그룹 공시체는 실험기간 중에 황철석과 다른 조암광물의 풍화가 지속적으로 진행되었으며, 황철석의 산화에 의하여 생성된 황산의 양이 다른 조암광물의 풍화에 소모되는 수소이온 보다 많아 배수의 pH가 지속적으로 감소하였다. 또한 모든 공시체로부터 유출되는 배수의 전기전도(용존 이온 농도의 지시자)는 시험기간 중에 지속적으로 증가하였다. A 그룹과 B 그룹에서 유출되는 배수의 전기전도도는 유사한 값을 나타내었으며 C group의 배수는 A 그룹과 B 그룹에 비해 약 6배 정도 높은 수치를 나타내었다. 이는 C 그룹에 함유된 황철석의 지속적인 산화과정에서 생성된 황산에 의하여 조암광물들의 풍화가 가속화되었음을 의미한다.

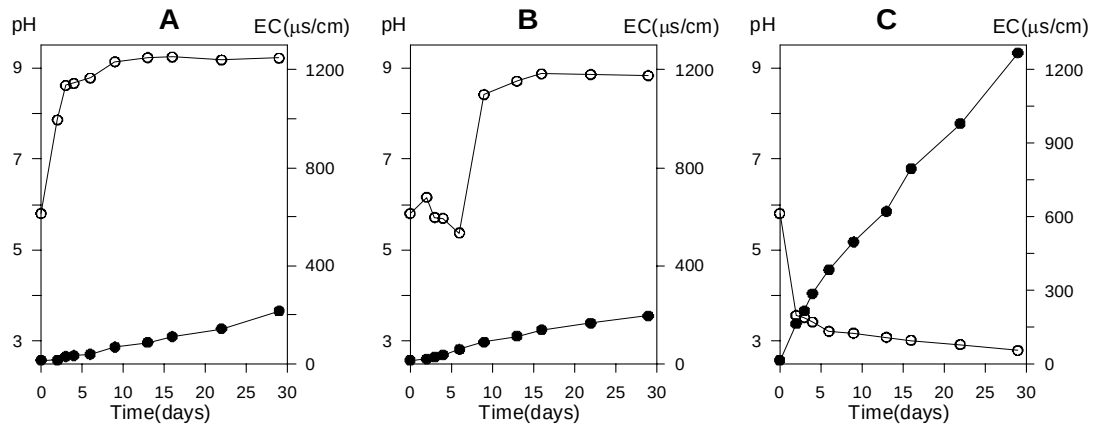


그림 36. 반응시간에 따른 pH, EC의 변화.

암석의 풍화과정에 용출되는 SO_4^{2-} 는 주로 황화광물의 산화과정에서 S의 산화에 의하여 생성되는데 C 그룹은 풍화시험동안 지속적으로 증가하였다. B 그룹은 반응 초기인 10일까지는 상대적으로 급격히 증가하다가 약 40ppm 수준에서 느린 속도로 증가하였다(그림 37). A 그룹은 10ppm 이하에서 약간 증가하는 현상을 보여 주었다. 이러한 SO_4^{2-} 의 농도변화는 전술한 황철석의 산화양상과 같은 경향을 나타내었다.

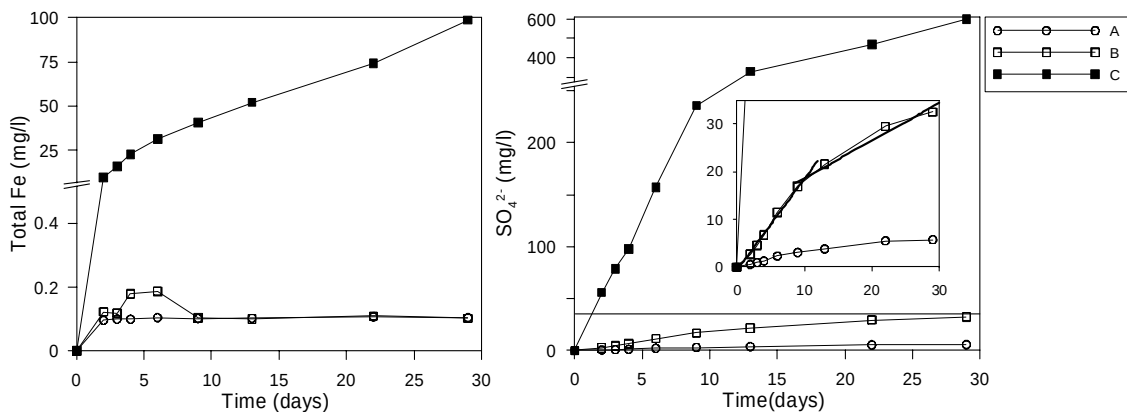


그림 37. 배수의 Fe와 SO_4^{2-} 의 농도변화.

암석의 풍화과정에서 다양한 종류의 이온들이 용출되어 나오는데 특히 황철석의 산화에 의한 풍화는 미량으로 함유된 중금속들이 산화과정에서 용출되어 지표수와 지하수의 오염원이 된다. A 그룹과 B 그룹의 배수는 Mn, Ni, Zn가 0.4ppm 이하로

함유하고 있으며 일반적으로 염기성 혹은 중성 암석의 풍화과정에서 용출되는 중금속의 농도와 유사한 경향을 나타내고 있다(그림 38). 반면 C 그룹은 높은 농도(특히 Zn : 2.4ppm, Ni : 1.3ppm)의 중금속이 용출되어 C 그룹 암석의 풍화는 주변 지역의 지표수, 지하수, 토양의 중금속 오염원으로 작용할 개연성이 높다.

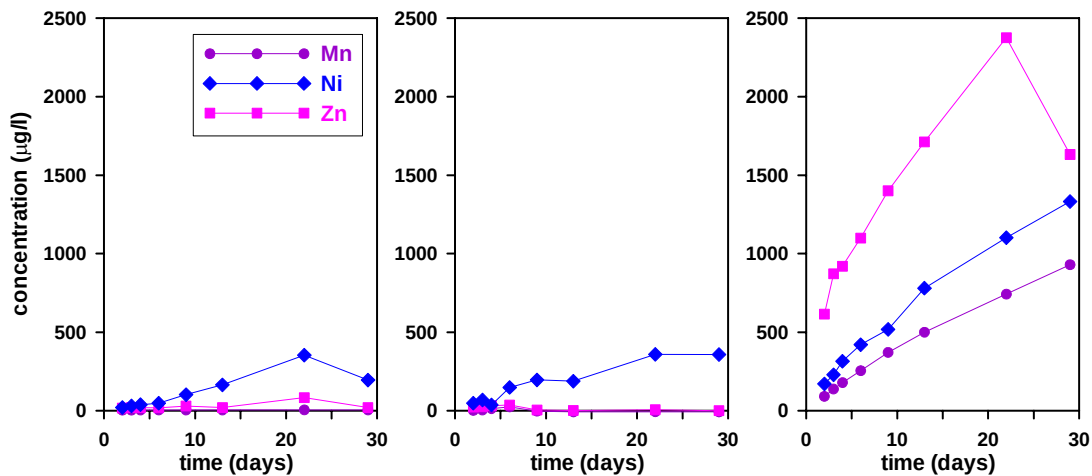


그림 38. 배수의 중금속 농도 변화.

나. 황철석의 산화에 의한 암석의 물성변화

풍화에 의한 암석의 물성변화는 조암광물의 용해와 광물의 열팽창성의 차이에 의한 광물경계면의 이완에 의한 공극율의 증가, 2차 광물에 의한 공극의 충전 등으로 밀도와 강도가 낮아진다. 풍화시험 전 시료의 흡수율은 A 그룹과 B 그룹은 약 0.1%정도로 비슷하였으며 C 그룹은 약 0.4%로 4배정도 높은 것으로 밝혀졌으며 풍화시험 후 A 그룹과 B 그룹 흡수율의 변화는 거의 없었다(그림 39). 반면 C 그룹은 풍화시험 후 흡수율이 약 11.7% 증가하였다. 이는 A 그룹과 B 그룹은 풍화가 공시체 표면에서 진행되어 공시체 전체의 흡수율에 영향을 주지 못했으며 반면 C 그룹은 미세한 crack을 따라 물이 침투되어 crack에 존재하는 황철석을 산화시키고 산화과정에서 생성된 황산이 주변광물의 풍화를 촉진시켜 공극률을 증가시킨 결과로 판단된다. 이러한 현상은 일축압축강도시험에서 생성된 단면에서 확인되었다(그림 40).

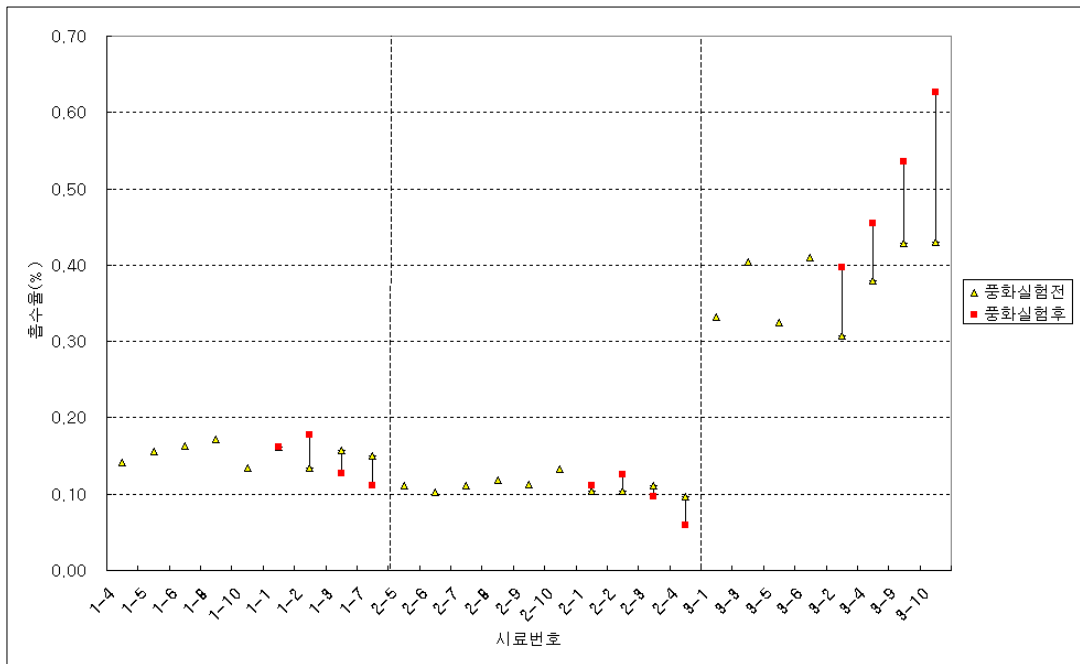


그림 39. 공시체의 풍화시험 전과 후의 흡수율 변화.

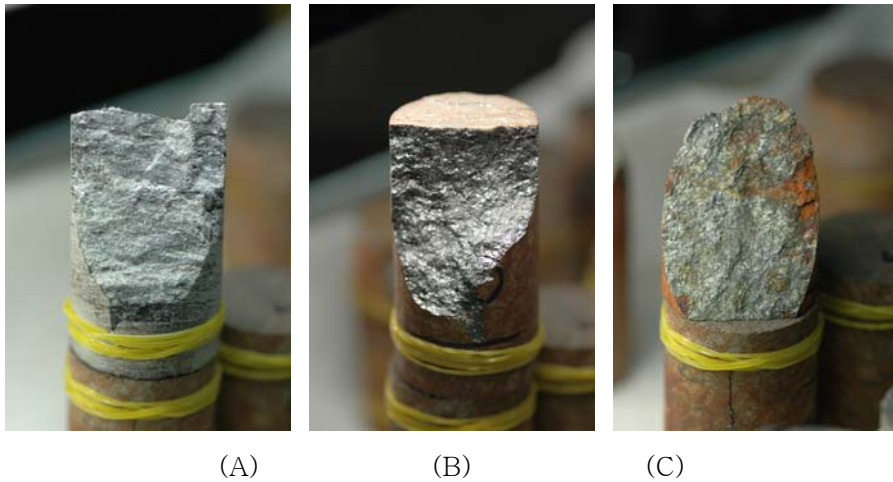


그림 40. 풍화시험 후 공시체의 파쇄 단면.

탄성파의 속도는 B 그룹이 가장 빠르며 A 그룹과 C 그룹은 유사한 값을 나타내었다. 암석의 탄성파 속도는 탄성율과 밀접한 관계를 가지고 있어, P파 및 S파의 속도를 가지고 Dynamic Young's Modulus와 Dynamic Poisson's ratio를 다음 식에서 구할 수 있다. 그러나 암석의 이방성, 절리의 발달, 광물입자의 크기 등이 탄성계수에 미치는 영향이 다양하므로 실질적인 탄성계수와는 차이를 보인다.

$$E_{dy} = \gamma V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad \nu_{dy} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

E_{dy} : dynamic Young's modulus

ν_{dy} : dynamic Poisson's ratio

γ : specific gravity in g.cm^{-3}

전체적인 암석 공시체의 탄성과 속도를 고려해보면 A 그룹과 C 그룹은 유사한 탄성률을 가지며 B 그룹은 다른 그룹에 비해 다소 높은 탄성률을 가질 것으로 판단된다. 풍화시험 후에 측정한 탄성파의 속도변화는 S파의 경우 모든 시료가 7 - 10% 정도의 감소율을 나타내었다. 반면 P파의 속도는 A 그룹과 C 그룹이 3 - 7%의 감소율을 G 그룹은 1 - 3%의 감소율을 보였다. 각 그룹별 탄성과 속도의 감소율을 고려하면 A 그룹과 C 그룹의 물성 감소율이 B 그룹 보다 클 것으로 예상된다(그림 41).

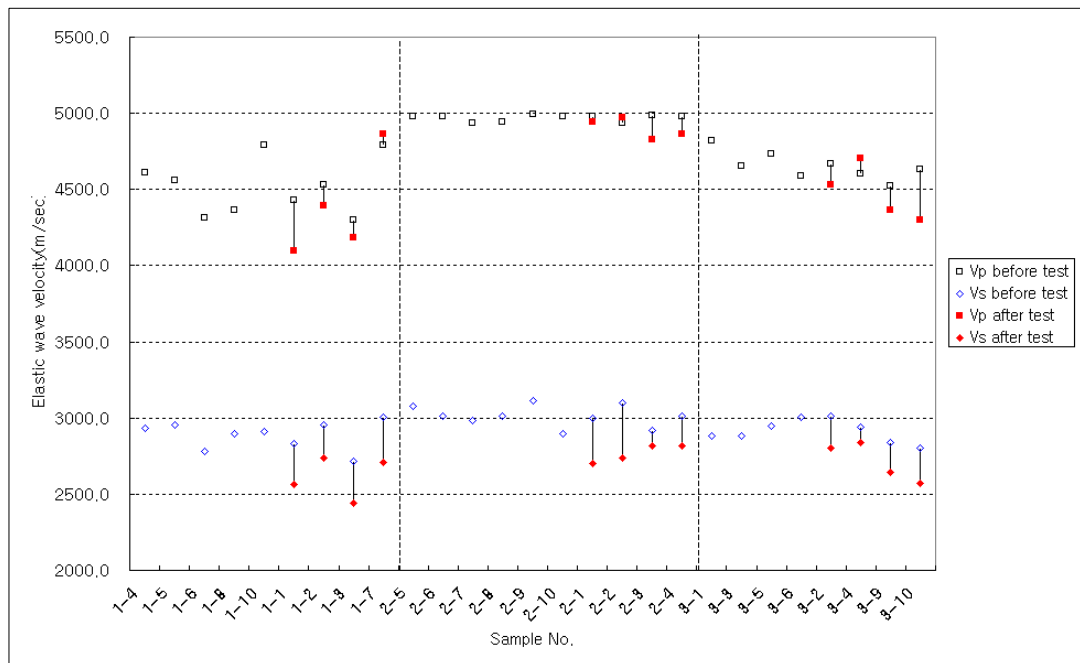


그림 41. 공시체의 풍화 전과 후의 탄성과 속도의 변화율.

표 8. 풍화시험 전과 후의 공시체의 탄성과 속도와 변화율.

Sample No.	P-wave velocity (m/sec)			S-wave velocity (m/sec)		
	before test	after test	reduction ratio (%)	before test	after test	reduction ratio (%)
1-1	4429.4	4098.0	7.5	2828.2	2563.4	9.4
1-2	4529.3	4397.1	2.9	2952.9	2738.2	7.3
1-3	4302.9	4183.3	2.8	2713.5	2438.9	10.1
1-7	4788.9	4866.1	-1.6	3002.0	2705.8	9.9
2-1	4981.0	4940.2	0.8	2998.5	2702.7	9.9
2-2	4933.6	4974.4	-0.8	3102.6	2735.9	11.8
2-3	4988.4	4828.8	3.2	2915.9	2820.6	3.3
2-4	4981.0	4860.5	2.4	3013.5	2816.4	6.5
3-2	4669.8	4529.3	3.0	3012.0	2801.9	7.0
3-4	4600.0	4707.8	-2.3	2939.5	2842.5	3.3
3-9	4527.1	4363.0	3.6	2840.1	2640.8	7.0
3-10	4630.0	4299.3	7.1	2799.5	2572.2	8.1

일축압축강도 시험결과, A 그룹은 풍화시험 후에 전체적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며 편차가 큰 시료의 값을 제외하면 풍화에 의하여 약 21% 정도의 감소를 나타내었다(그림 42, 표 8). B 그룹은 풍화에 의한 일축압축강도의 감소율은 약 11%로서 다른 그룹에 비해 상대적으로 낮았다. C 그룹의 경우, 풍화시험 후에 측정한 일축압축강도는 두개의 그룹(강도가 감소한 그룹과 감소가 일어나지 않은 그룹)으로 구분 된다. 일축압축강도시험 시에 나타난 파쇄형태를 살펴보면 무결암에서 나타나는 파쇄형태와 절리를 따라 파쇄된 형태를 볼 수 있다(그림 43). 무결암의 파쇄형태를 보이는 공시체는 강도변화가 없는 것으로 나타났으며 절리를 따라 파쇄된 공시체의 강도감소율은 약 45%였다(표 9). 이는 crack을 따라 물이 침투되고 crack에 존재하던 황철석이 산화되어 풍화를 촉진하여 강도를 저하시킨 것으로 판단된다.

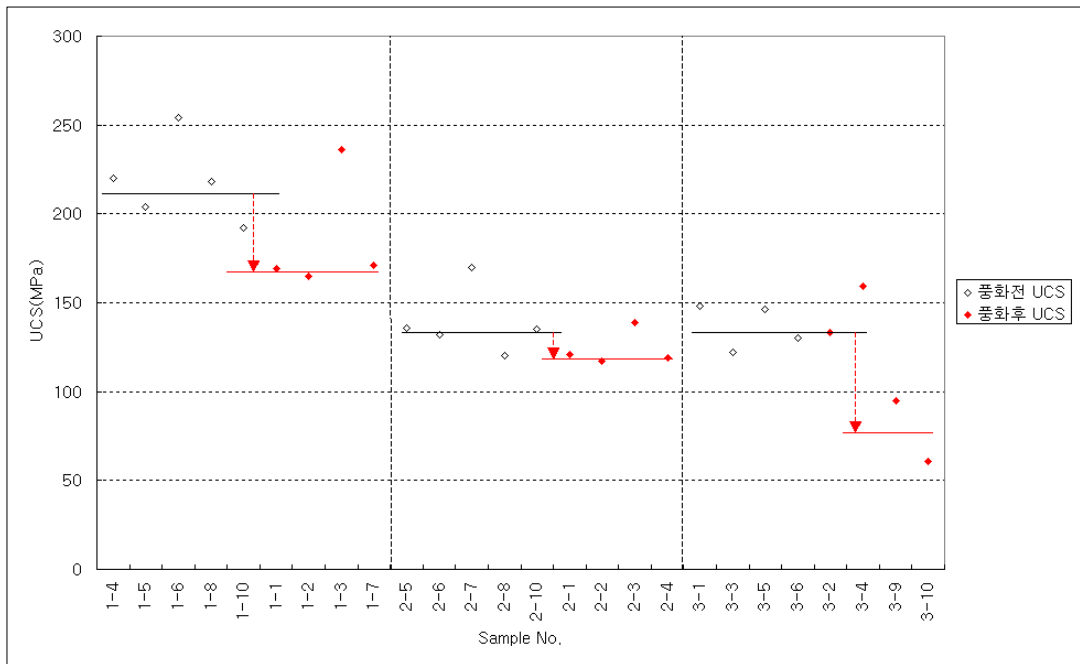


그림 42. 풍화시험 전과 후의 공시체의 일축압축강도의 변화.



그림 43. 풍화시험 후 C 그룹의 공시체 파쇄특성.

표 9. 풍화시험 전과 후의 공시체의 일축압축강도와 감소율.

Sample No.	UCS (MPa)		Reduction ratio (%)
	before leaching	after leaching	
1-4	-	220	
1-5	-	204	
1-6	-	254	
1-8	-	218	
1-10	-	192	
1-1	169	-	
1-2	165	-	
1-3	236	-	
1-7	171	-	
Average	185	218	14.9%
Average*	168	214	21.3%
2-5	-	136	
2-6	-	132	
2-7	-	170	
2-8	-	120	
2-10	-	135	
2-1	121	-	
2-2	117	-	
2-3	139	-	
2-4	119	-	
Average	124	139	10.5%
Average*	119	134	11.2%
3-1	-	148	
3-3	-	122	
3-5	-	146	
3-6	-	130	
3-2	133	-	
3-4	159	-	
3-9	95	-	
3-10	61	-	
Average	112	137	17.9%
Average*	78	141	44.8%

Average* : average of UCS excluding the values of big deviation

A와 B 그룹의 배수에서 생성된 침전물은 비결정질의 silicate이며 C 그룹의 배수에서 생성된 적철석(hematite)으로 밝혀졌다(그림 44, 45). A와 B 그룹의 배수에서 생성된 비정질의 규산염광물은 알루미늄규산염광물의 풍화에 의해서 용출된 Si가 알칼리 환경에서 다른 양이온들과 반응하여 침전된 것으로 판단다. C 그룹의 배수에서 생성된 적철석은 황철석의 풍화과정에서 용출된 철이 침전된 것으로 판단된다. C 그룹의 배수는 pH가 약 3정도로 규산염광물의 침전에 적합한 환경이 아니나 적

철석의 침전은 가능한 환경으로 판단된다. 이러한 적철석의 침전은 암반산성배수가 발생하는 절취사면의 붉은색 침전물과 동일한 것으로 판단된다.

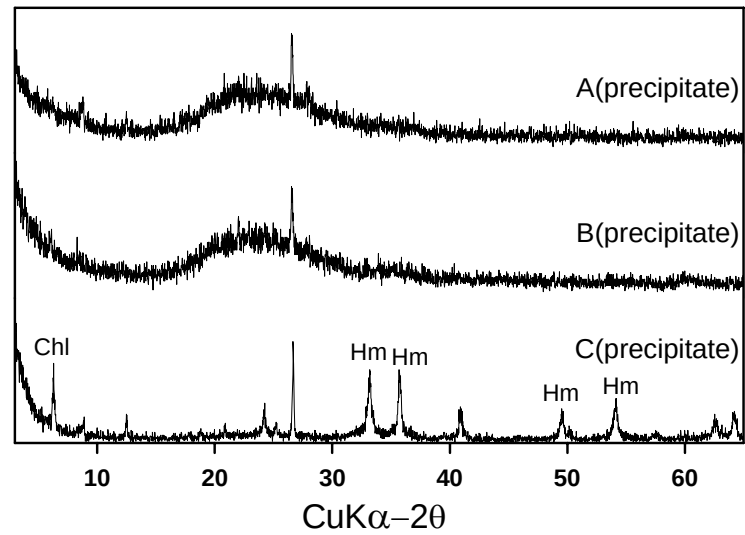


그림 44. 배수의 침전물의 조성.

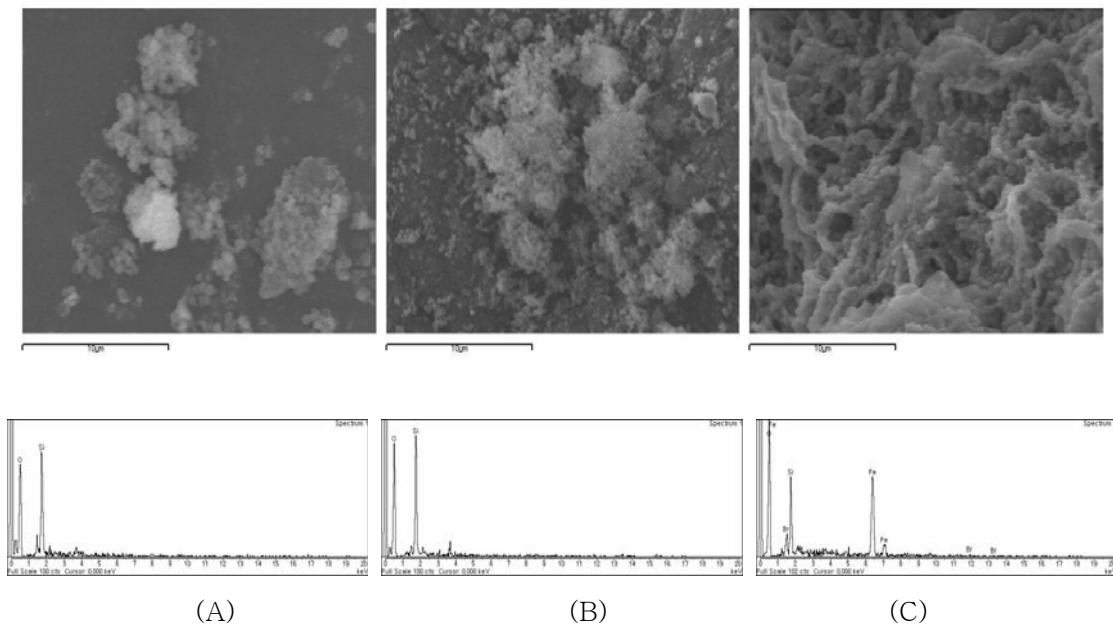
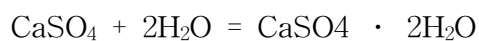
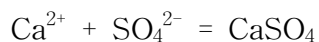
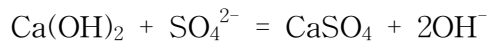
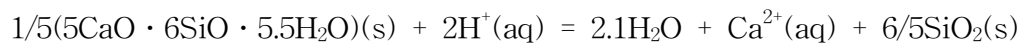
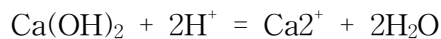


그림 45. A, B, C 그룹 배수 침전물의 전자현미경사진과 화학조성.

제 6절. 산성암반배수에 의한 콘크리트 구조물의 부식

1. 이론적 접근 방법

산성암반배수는 황철석이 사면에 노출되어 산화되는 과정에서 생성된 황산을 많이 함유하고 있어 강산성으로서($\text{pH} < 3.5$) 사면의 암반뿐만 아니라 사면의 콘크리트와 철재 구조물에 대한 부식성이 강하다. 암반산성배수가 숏크리트피막과 반응하여 배면공동의 형성, 표면부식이 발생되어 사면안정성이 저해되는 현상을 현장조사에서 많이 관찰되었다. 따라서 본 연구에서 암반산성배수에 의한 사면 콘크리트 구조물 특성을 정량적으로 이해하고자 콘크리트코어 부식시험을 실시하였다. 콘크리트는 골재(aggregate)와 교결물질(cementing material)로 이루어져 있다. 교결물질은 규산염수화물(hydrate silicate), 칼슘알루미늄규산염수화물(hydrate calcium aluminosilicate), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 주종을 이룬다. 교결물질이 황산과 반응하면 다음과 같은 화학적 반응이 일어날 것으로 판단된다.



이러한 반응과정에서 교결물질은 용출되고 골재와의 접합면이 느슨하게 되어 콘크리트의 강도를 저하시킨다. 황산에 의한 콘크리트의 부식은 사면안정성 저해, 안전사고 발생으로 이어질 개연성이 높다.

2. 시험 방법

가. 공시체 정형 및 양생

모래(48%) + 시멘트(39%) + 물(13%)의 배합비로 콘크리트 주형(mold)을 제작하여 28일간 실내에서 양생 후 실린더형의 코어(D32*L40 mm)를 채취하여 공극률 측정, 부식시험, 일축압축강도시험에 사용하였다.

나. 황산에 의한 콘크리트 부식시험

pH 3 황산용액 10L에 콘크리트 코어 6개를 담그고 0, 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11주간 부식 시험을 하였다. 부식시험 중에 1주일에 2번씩 pH를 점검하여 용액의 pH가 3 ± 1 이 되도록 조정하였다. 일정기간 황산용액에서 부식을 한 콘크리트 코어를 증류수에 담그고 1시간 동안 초음파교반기(sonicator, Branson 5510)를 이용하여 부식된 부분을 제거하고 48시간 동안 105℃ 오븐에서 건조 후 무게변화를 측정하였다. 코어에서 초음파교반기에 의하여 분리된 부식산물은 0.45 μ m 여과막을 이용하여 회수하였다.

시료분석

코어에서 분리된 부식산물과 부식되지 않은 신선한 콘크리트의 조성을 파악하기 위하여 X-선 회절분석기를 이용하여 분석하였다. 부식된 코어와 부식시험에 사용하지 않은 신선한 코어의 일축압축강도를 측정하였다.

다. 연구 내용 및 결과

황산에 의하여 코어표면의 부식현상이 3주 이후부터 육안으로 관찰되며(그림 46) 부식에 의하여 코어의 무게가 시험시간이 경과됨에 따라 지속적으로 감소하였다. 황산에 의한 부식은 산에 약한 알칼리성 교결물질이 지속적으로 용출되어 코어의 조성은 교결물질의 함량이 감소하고 반면 상대적으로 골재(모래)성분이 증가하는 양상을 보여 주었다. X-선 회절분석 결과 교결물질로 존재하던 포틀랜드아이트는 7일 경과 후 산에 의해 용해된 것으로 해석되었다(그림 47). 부식된 표면에서는 2차 광물로 알루미늄화합물이 생성되었다.



그림 46. 콘크리트 코어 단면사진 (상부로부터 각 0, 7, 14, 21, 35, 42, 49, 77일 경과 후)

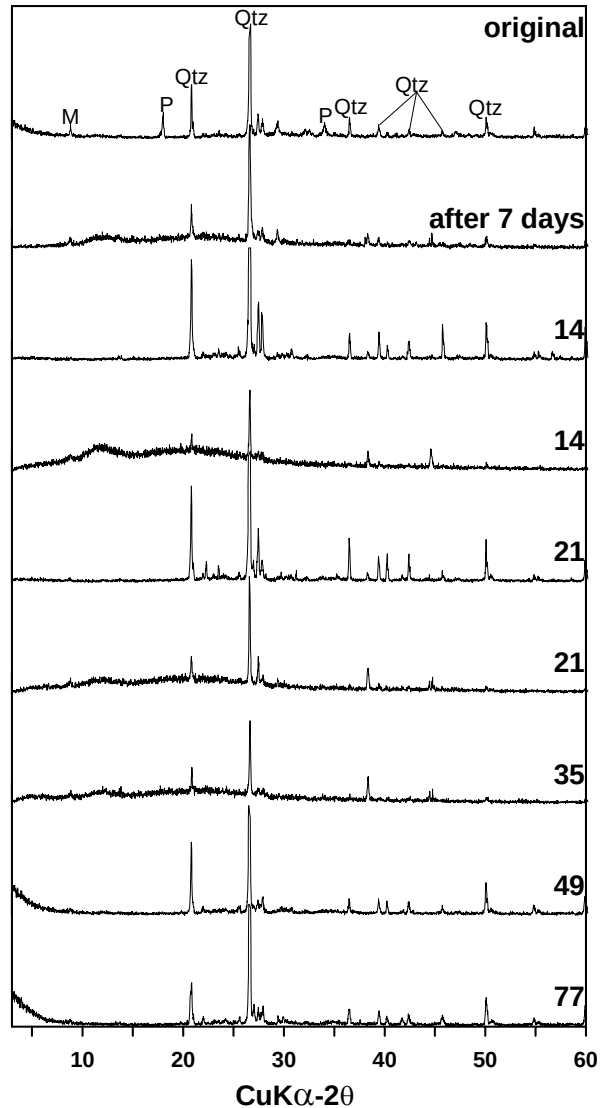


그림 47. X-선 회절분석에 의한 콘크리트 코어의 광물조성 (M, 운모; P, 포틀란다이트; Qtz, 석영)

초기 3주간 부식된 코어의 일축압축강도는 증가하다가 3주 이상 부식된 코어의 강도는 점진적으로 감소하였다(그림 48). 이는 초기 3주간의 부식에 의한 강도증가는 양생에 의한 강도 증가가 부식에 의한 압축강도 감소보다 큰 것으로 판단된다. 반면, 3주 이상 부식된 코어는 부식에 의한 강도저하가 양생에 의한 강도증가보다 커서 전체 강도가 감소한 것으로 판단된다. 무게는 지속적으로 감소하였다(그림 49).

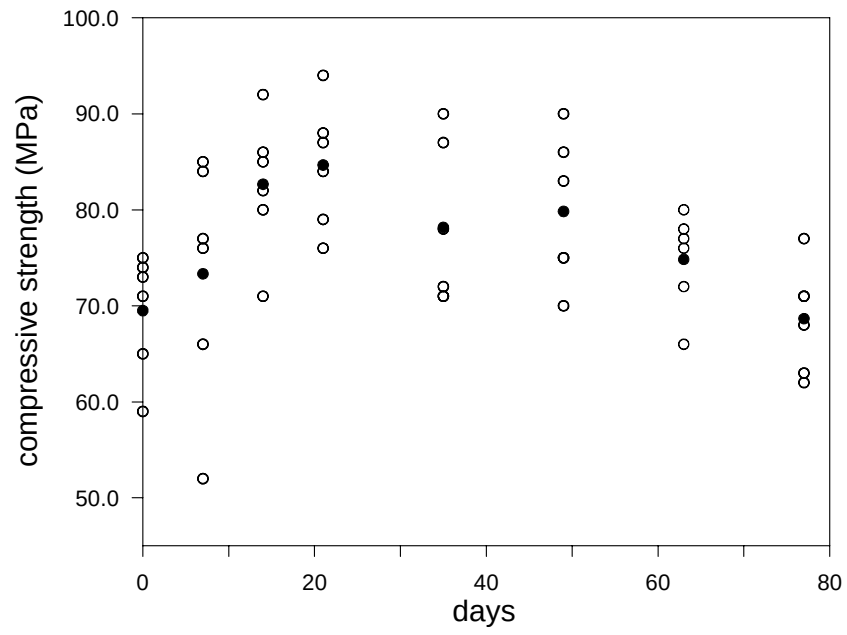


그림 48. 코어의 일축압축강도 변화.

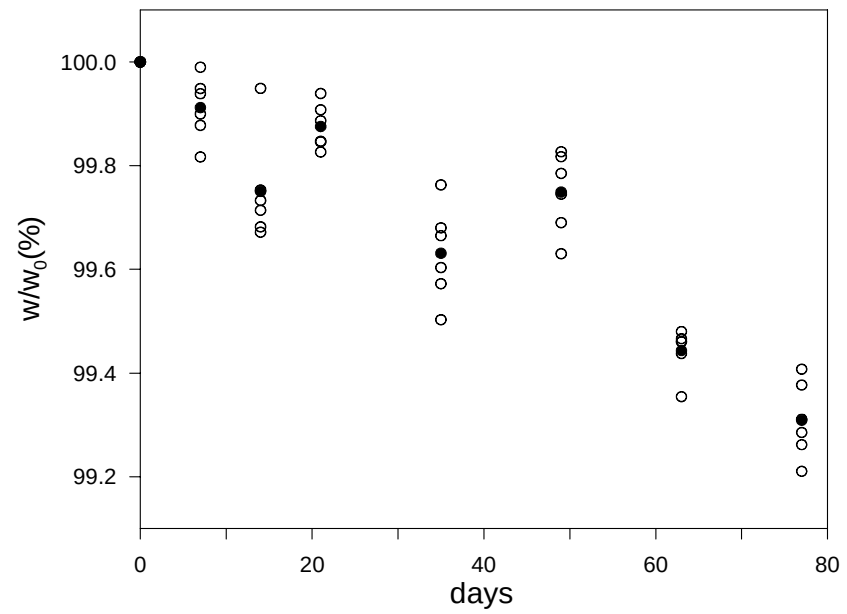


그림 49. 코어의 무게 변화.

제 7절. 백화현상과 암반산성배수 발생 사면의 흰색 침전물의 비교분석

1. 이론적 접근

콘크리트의 백화현상은 수용성 성분이 표면으로 이동하여 수분만 증발됨으로서 석출된 흰색물질이 콘크리트 표면에 침전되는 현상을 말한다(그림 50). 백화현상은 콘크리트의 물성이 저하되고 외관의 손상을 초래한다. 반면 암반산성배수가 발생하는 사면의 흰색 침전물은 황철석의 산화에 의하여 생성된 황산이 aluminosilicate 광물을 용해하고 광물의 용해과정에 용출된 Al이 산성배수의 pH가 증가함에 따라 침전된 황산알루미늄 혹은 수산화알루미늄이다. 이는 외관상 비슷하게 보이나 백화현상과 생성과정과 조성이 다르다. 암반산성배수가 발생하는 사면에 시공한 슛크리트 피막표면에도 황산알루미늄 혹은 수산화알루미늄의 침전물이 생성되는데(그림 51) 백화현상과 혼돈을 야기하기도 한다.

2. 시료 채취 및 분석

백화현상이 나타난 콘크리트 구조물 표면의 흰색 침전물과 암반산성배수 발생사면의 콘크리트표면에 생성된 흰색 침전물을 채취하여 XRD를 이용하여 조성분석을 실시하였다.



그림 50. 백화현상.



그림 51. 슛크리트 표면의 흰색 침전물.

3. 연구 결과

산성암반배수가 발생하는 사면의 슛크리트 표면에 침전된 흰색 침전물은 황산알루미늄과 수산화알루미늄, 붉은색 침전물은 산화철로 밝혀졌으며 백화현상의 흰색침전물은 탄산칼슘으로 판명되었다(그림 52).

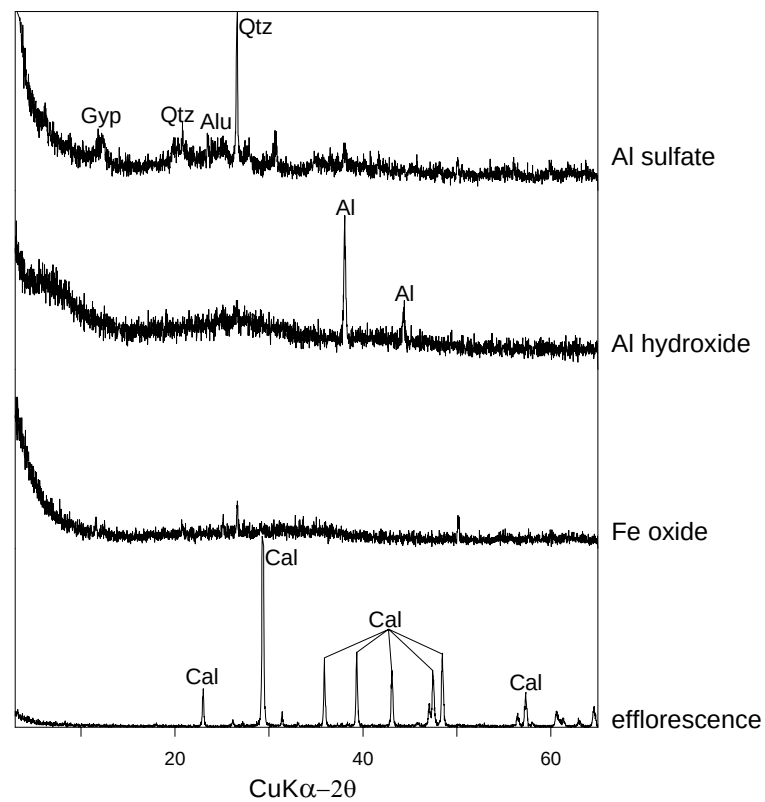


그림 52. 백화현상과 암반산성배수 발생 사면의 흰색 및 붉은색 침전물의 조성

제 8절. 최적 피막형성 조건 도출

1. 이론적 접근 방법

표준 황철석의 산화시험에서 밝혀진 바에 의하면, 산화과정에서 황철석 표면에서 2가 혹은 3가 철(Fe)이 먼저 용출된 다음 SO_4^{2-} 이온이 용액으로 용출되는 것으로 밝혀졌다. 또한 신선한 황철석 표면의 일부에 2가 철이 노출되어 있다. 산화과정에 용출되는 철과 신선한 표면에 노출되어 있는 철은 인산염과 반응하여 비비아나이트(vivianite), 스트렝자이트(strengite)와 같은 안정된 철인산염광물로 쉽게 침전된다. 결정학적인 관점에서 신선한 황철석의 표면에 철이 노출된 면적은 약 1/3 정도로 추정되며 산화반응이 발생하지 않은 표면을 인산염으로 처리하면 충분한 코팅이 일어나지 않으며 코팅 후에도 추가적으로 발생하는 산화반응을 효율적으로 저감할 수 없을 것으로 판단된다. 따라서 피막형성제에 의하여 황철석의 산화반응과 철인산염 광물의 생성이 동시에 이루어지면 효과적으로 표면코팅이 일어나고 추가적인 산화반응에 의한 황산의 생성을 효율적으로 저감할 수 있을 것으로 판단된다. 피막형성제는 산화제와 코팅제를 모두 함유하고 있어 2차 환경오염문제가 발생할 수 있다. 피막형성공법 적용 시에 발생할 수 있는 2차 환경오염은 황철석의 산화에 의하여 생성되는 황산과 중금속, 지표수의 부영양화 원인 물질인 인산염의 주변지역 유출이다. 이러한 환경오염문제를 해결할 수 있는 대책으로 피막형성제를 사면에 살포 후 황산의 중화, 중금속의 불용화, 인산 제거를 위한 2차 처리제의 살포가 필요하다. 따라서 본 실험에서는 원활한 피막형성조건의 도출뿐만 아니라 2차 처리제에 대한 연구를 진행하였다. 황철석 표면에 형성된 피막의 안정성과 내구성을 시험하였다.

2. 시험 방법

가. 시료 준비

표준 황철석을 $63\mu\text{m}$ 이하의 입도가 되도록 분쇄한 후 염산으로 표면을 세척하였다. 세척에 의해 산화철 등을 제거한 후 다시 아세톤을 이용하여 표면을 세척한 후 피

막형성시험 전에 산화, 코팅 등을 방지하기 위하여 진공상태에서 보관하였다.

나. 최적 피막형성조건 도출을 위한 시험

상온(20℃)에서 다양한 조건(총 46조건)의 피막형성제를 이용하여 표준 황철석을 대상으로 피막형성시험을 실시하여 최적의 피막형성조건을 도출하였다(표 10).

표 10. 피막형성제의 종류.

조건	PO ₄ 농도	H ₂ O ₂ 농도	pH	조건	PO ₄ 농도	H ₂ O ₂ 농도	pH
1	0.0001M	0.01M	2	24	0.001M	0.05M	6
2			3	25		0.08M	2
3			6	26			3
4		0.02M	2	27			6
5			3	28		0.1M	2
6			6	29			3
7		0.05M	2	30			6
8			3	31	0.01M	0.01M	2
9			6	32			3
10		0.08M	2	33			6
11			3	34		0.02M	2
12			6	35			3
13		0.1M	2	36			6
14			3	37		0.05M	2
15			6	38			3
16	0.001M	0.01M	2	39			6
17			3	40		0.08M	2
18			6	41			3
19		0.01M	2	42			6
20			3	43		0.1M	2
21			6	44			3
22		0.05M	2	45			6
23			3				

피막형성시험 시에 피막형성여부를 알아보기 위하여 용액의 pH, Fe함량, SO₄²⁻ 함량을 측정하였다. 상온에서 피막형성조건도출을 위한 조건은 아래 표와 같다. 우리나라는 4계절이 명확하여 계절별로 온도차가 심하다. 암석표면온도는 -10℃에서 70℃으로 조사되었다. 이러한 암석표면온도의 변화가 피막형성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 상온에서 도출된 최적피막형성조건을 기준으로 온도 4℃와 70℃ 조건에서 피막형성시험을 실시하였다. 피막형성제에 사용된 화학약품은 KH₂PO₄,

30% H_2O_2 , NaOAc 를 이용하였다.

다. 효율성 및 내구성 시험

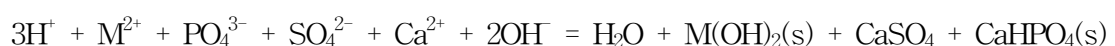
최적 피막형성조건에서 피막형성을 형성시킨 표준 황철석을 pH 3 - 10과 H_2O_2 농도 0 - 0.1M에서 피막의 효율성 및 내구성을 시험하였다. 시험에서는 각 조건에서 24시간 반응 후 pH, PO_4^{3-} 농도, SO_4^{2-} 농도, 중금속 농도, Fe 농도를 측정하여 피막의 안정성과 내구성을 확인하였다.

라. 표면분석

피막이 형성된 황철석과 피막형성을 위한 처리를 하지 않은 황철석의 표면상태를 반사현미경, 전자현미경(SEM), X-선 광전자 분광기(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)를 이용하여 표면에서 피막의 형성여부 및 두께를 측정하였다.

마. 2차 환경오염저감을 위한 2차 처리 시험

피막형성제는 H_2O_2 와 PO_4^{3-} 용액이 함유되어 있다. H_2O_2 는 피막형성기간 동안 황철석을 산화시켜 황산을 생성함과 동시에 황철석에 미량으로 함유된 중금속들을 용출시킨다. 또한 철과 반응하여 철인산염 피막을 시키는 PO_4^{3-} 는 지표수에 유입되면 부영양화를 유발하는 오염물질로 알려졌다. 암반산성배수의 발생저감을 위해 절취사면에 피막형성제를 살포하게 되면 피막형성과정에서 생성된 황산과 중금속, 여액에 남아있는 PO_4^{3-} 는 2차 환경오염을 유발시킬 개연성이 많다. 따라서 피막형성제의 살포 후 산의 중화 및 중금속과 PO_4^{3-} 의 제거를 위한 2차 처리가 필요하다. 문헌연구를 바탕으로 산의 중화 및 오염물질의 제거에 적합한 물질로 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 도출되었다.



위 반응식에서와 같이 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 에 의하여 황산의 중화, 중금속 및 PO_4^{3-} 의 제거가

가능하다고 판단된다. 또한 CaHPO_4 는 중금속으로 오염된 토양, 지하수, 지표수의 정화에 널리 쓰이는 환경소재로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 황철석을 피막 형성제로 처리한 후 여액에 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 용액을 첨가하여 pH, PO_4^{3-} 농도, 중금속 농도의 변화를 측정하여 2차 환경오염방지 여부를 시험하였다.

3. 연구 결과

가. 산성배수발생저감을 위한 최적 피막형성조건과 피막의 효율성 및 내구성

황철석과 피막형성제(PO_4^{3-} , H_2O_2)가 반응하면 수소이온(H^+), SO_4^{2-} , Fe이 생성된다. 반응 중에 생성된 Fe는 PO_4^{3-} 과 반응하여 철인산염이 표면에 침전하여 피막을 형성하게 된다. 피막의 형성정도는 피막형성반응 후에 용액 중의 SO_4^{2-} 와 Fe의 농도로 파악할 수 있다. 반응 후 용액의 특성은 표 11와 같다.

표 11. 피막형성제의 종류와 반응 후 용액의 pH, Fe농도, SO_4^{2-} 농도.

피막형성제			반응 후 용액 특성				
PO_4	H_2O_2	pH	pH	Fe			SO_4^{2-}
(M)	(M)	initial	final	total(mg/l)	Fe^{2+} (mg/l)	Fe^{3+} (mg/l)	(mg/l)
0.0001	0.01	2.07	2.02	43.523	50.458	-6.935	1232.234
0.0001	0.01	3.09	2.76	44.629	27.321	17.308	613.683
0.0001	0.01	6.03	3.02	34.941	20.304	14.637	363.213
0.0001	0.02	2.07	2.10	41.565	43.852	-2.286	1238.077
0.0001	0.02	3.11	2.74	50.591	44.817	5.774	709.768
0.0001	0.02	6.08	3.06	39.186	20.366	18.820	430.182
0.0001	0.05	2.05	2.08	47.663	43.740	3.923	1336.840
0.0001	0.05	3.05	2.69	56.567	39.766	16.800	669.608
0.0001	0.05	6.11	2.97	49.510	30.720	18.789	494.229
0.0001	0.08	1.96	1.98	54.357	63.972	-9.615	1635.857
0.0001	0.08	3.03	2.67	62.840	33.374	29.466	721.870
0.0001	0.08	6.06	2.89	62.432	33.365	29.067	579.442
0.0001	0.1	1.99	2.02	60.918	51.393	9.525	1596.434
0.0001	0.1	3.10	2.66	67.382	42.684	24.697	766.116
0.0001	0.1	6.15	2.86	64.878	43.609	21.268	607.713
0.001	0.01	2.05	2.01	40.479	46.401	-5.922	1231.859
0.001	0.01	3.07	2.61	7.097	8.411	-1.313	385.130
0.001	0.01	6.06	2.84	4.136	2.379	1.757	345.181
0.001	0.02	2.02	1.99	42.808	44.788	-1.980	1214.021
0.001	0.02	3.06	2.57	10.158	10.694	-0.535	445.689
0.001	0.02	6.11	2.66	17.787	16.210	1.577	466.715
0.001	0.05	1.98	2.00	65.577	54.748	10.829	1319.049
0.001	0.05	3.04	2.48	23.068	18.529	4.539	575.637
0.001	0.05	6.08	2.59	30.172	20.566	9.606	581.957
0.001	0.08	1.98	1.98	78.504	63.191	15.313	1493.573
0.001	0.08	3.09	2.43	40.770	30.137	10.633	731.916
0.001	0.08	6.09	2.57	48.690	27.219	21.471	706.575
0.001	0.1	2.00	2.00	91.606	67.780	23.826	1524.759
0.001	0.1	3.09	2.42	47.350	28.824	18.527	755.597
0.001	0.1	6.00	2.50	57.948	32.617	25.331	741.458
0.01	0.01	2.01	2.03	28.553	17.321	11.233	1442.537
0.01	0.01	2.99	2.62	2.191	0.214	1.977	354.713
0.01	0.01	6.00	5.21	0.122	0.025	0.098	143.686
0.01	0.02	2.01	2.02	29.751	13.282	16.469	1260.934
0.01	0.02	3.00	2.50	3.514	0.925	2.589	503.152
0.01	0.02	5.98	5.14	0.053	0.054	-0.001	124.031
0.01	0.05	1.99	1.91	36.290	9.814	26.476	739.369
0.01	0.05	2.98	2.30	6.506	0.845	5.661	836.833
0.01	0.05	5.97	4.96	0.685	0.224	0.462	215.379
0.01	0.08	2.05	1.93	38.128	3.481	34.647	1600.859
0.01	0.08	3.02	2.17	11.448	2.180	9.268	1017.961
0.01	0.08	5.97	4.61	0.006	0.125	-0.119	383.788
0.01	0.1	2.04	1.90	44.010	3.637	40.373	1731.939
0.01	0.1	3.02	2.16	12.388	0.986	11.402	1049.115
0.01	0.1	5.98	4.37	0.055	0.346	-0.291	512.619

초기와 반응 후의 pH 저감이 적을수록, 용액 내의 SO_4^{2-} 와 Fe의 농도가 낮을수록 피막형성이 잘되는 것으로 판단된다. 따라서 pH의 변화, Fe의 농도와 SO_4^{2-} 농도의 변화를 고려할 때, 피막형성제가 PO_4^{3-} 농도 0.01M, H_2O_2 농도 0.01M, pH 6의 피막형성제가 최적인 것으로 판명되었다(그림 53, 54).

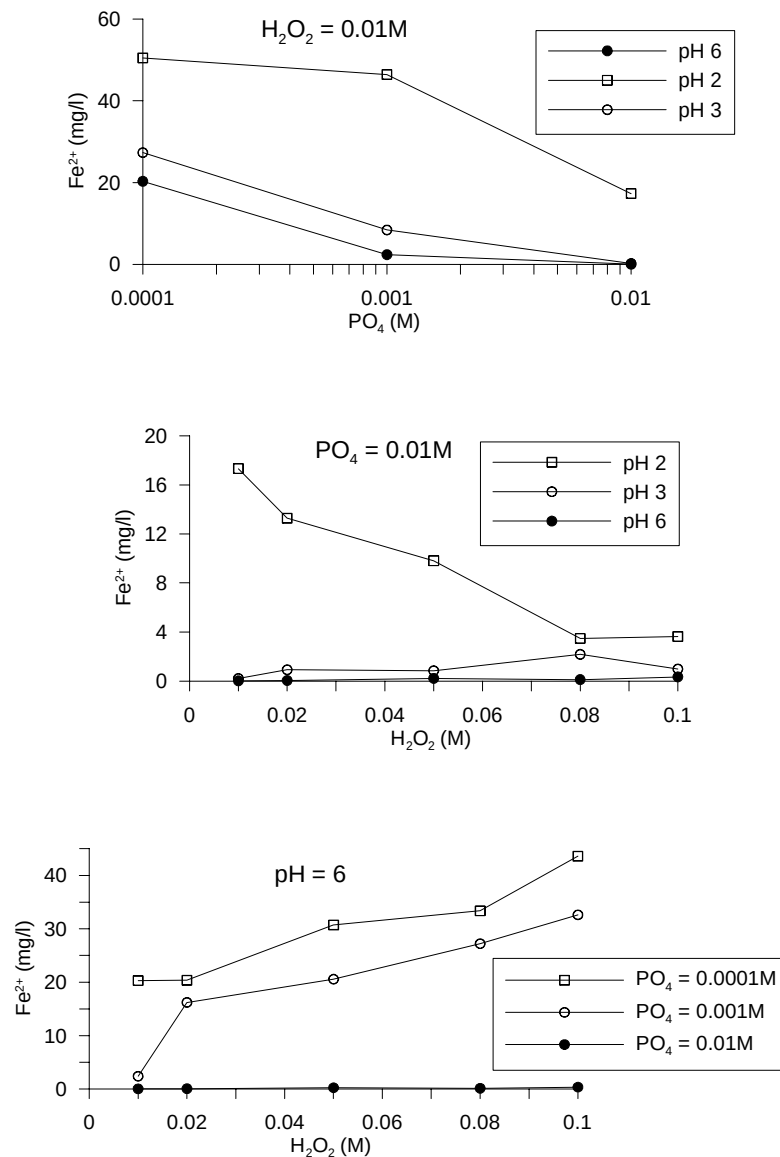


그림 53. 피막형성제의 종류별 반응용액의 Fe²⁺ 농도 변화

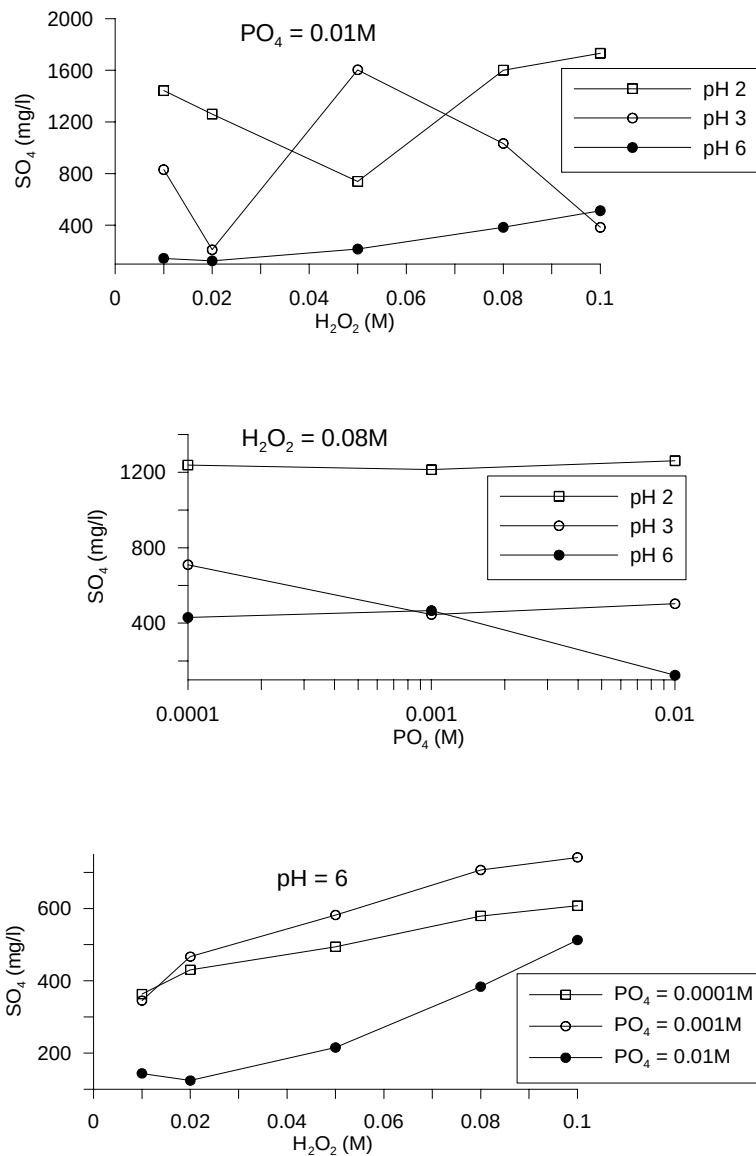


그림 54. 피막형성제의 종류별 반응용액의 SO_4^{2-} 농도 변화

0.01M PO_4^{3-} , 0.01M H_2O_2 , pH 6 (NaOAc) 조건에서 피막을 형성시킨 황철석과 피막처리를 하지 않은 황철석을 대기과 평형상태에 있는 증류수와 반응시킨 결과는 피막에 의하여 황철석의 산화에 의한 황산발생량을 81% 저감하는 것으로 나타났다(표 10). 극한상황을 상황을 상정하여 H_2O_2 용액과 반응시킨 결과 52 - 80% 정도의 황산발생량을 저감시켰다(표 12). 이러한 결과는 철인산염 피막이 사면에서 발생하는 암반산성배수를 효율적으로 저감시킬 수 있음을 의미한다.

표 12. 다양한 조건에서 산성배수발생저감 비율.

반응용액	구 분	반응 후 용액의 H ⁺ 이온 농도(mM)	피막에 의한 황산발생 저감률	시험조건
증류수	피막처리	0.19	80.9%	황철석과 용액의 비율이 1: 10의 현탁액을 상온(20℃)에서 24시간 반응
	무처리	1.01		
0.0001M H ₂ O ₂ 용액	피막처리	0.21	80.9%	
	무처리	1.10		
0.001M H ₂ O ₂ 용액	피막처리	0.40	72.2%	
	무처리	1.44		
0.01M H ₂ O ₂ 용액	피막처리	1.08	51.8%	
	무처리	2.24		

최적조건에서 형성된 피막의 안정을 시험한 결과 pH 3 - 10 조건에서 96% 이상의 피막이 손상되지 않고 안정하게 유지되는 것으로 밝혀졌다(표 13).

표 13. pH 3 - 10 조건에서 철인산염 피막으로부터의 PO₄³⁻ 용출량.

반응조건	pH 3	pH 5.8	pH 10
PO ₄ ³⁻ 용출량	1.12mg/g (3.20%)	0.36mg/g (1.04%)	1.17mg/g (3.36%)
피막형성 처리된 황철석의 PO ₄ ³⁻ 함유량	34.92mg/g		

최적 피막형성제를 이용하여 피막형성이 끝나고 난후 반응용액의 PO₄³⁻ 농도는 약 680ppm으로 조사되었다. 이는 피막형성제에 함유되었던 PO₄³⁻는 대부분 철인산염으로 침전되어 피막형성에 소모된 것으로 판단된다. 지표수 부영양화를 야기하는 PO₄³⁻의 농도는 0.03ppm 이상으로 보고되고 있다. 반응 후 용액의 PO₄³⁻ 농도가 지표수 부영양화 기준치를 상회하고 있으며 용액의 pH는 5.2로서 환경부 기준치(5.8 - 8.5)를 약간 초과하고 있다. 따라서 피막형성 후 용액이 2차 환경오염을 유발할 개연성이 있어 산의 중화, PO₄³⁻와 중금속을 제거하기 위하여 Ca(OH)₂를 이용하여 2차 처리시험을 시행하였다. 0.01% Ca(OH)₂ 용액을 여액의 50% 정도 첨가한 결과 중금속 농도를 현격히 (특히 Zn은 측정한계치 이하) 감소시켰으며 PO₄³⁻는 약 45%

를 제거하였다(표 14).

표 14. 중화제 첨가에 따른 pH, PO₄³⁻, 중금속 농도의 변화.

0.1% Ca(OH) ₂ 용액 첨가량(ml)	최종 pH	Zn	Pb	Cd	Cu	Mn	Fe	PO ₄ ³⁻ (ppm)
		----- (ppb) -----						
0/100	5.58	87.0	7.0	2.7	129.0	7.3	82.8	680.1
1.5/100	6.98	82.7	10.3	3.0	122.9	6.6	75.3	680.7
15.3/100	6.99	72.0	17.7	10.1	111.2	10.1	88.0	678.0
29/100	7.13	0.0	9.5	2.6	1.9	3.0	10.4	527.5
50/100	7.68	0.0	8.5	3.0	1.7	3.0	9.0	370.7

나. 계절적 영향(온도영향)

(20℃)에서 도출된 최적조건을 초봄과 늦가을, 여름의 암석표면온도로 추정되는 4℃와 70℃에서 피막형성시험을 실시하고 이를 다시 4℃와 70℃에서 산화 시험한 결과 상온에서와 유사한 효능을 발휘하였다(표 15).

표 15. 피막형성시 온도조건에 따른 효능시험 결과

피막형성 온도조건	산화시험시 온도조건 (℃)	total Fe (mg/l)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)
무처리	4	30.336	0.145	352.305
무처리	70	65.536	1.124	673.449
4℃	4	9.008	0.986	220.509
4℃	70	33.304	9.196	518.999
70℃	4	8.392	0.366	135.910
70℃	70	34.944	8.009	310.770

다. 표면분석

반사현미경 관찰결과 피막처리를 실시한 황철석은 처리하지 않은 황철석에 비해 표면에 산화철의 침전이 적은 것으로 관찰되었다. 이는 표면에 형성된 피막에 의해

황철석의 산화가 저감되었음을 의미한다(그림 55, 56).

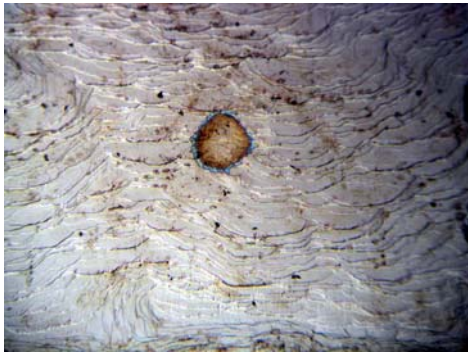


그림 55. 피막형성처리를 한 황철석 표면.

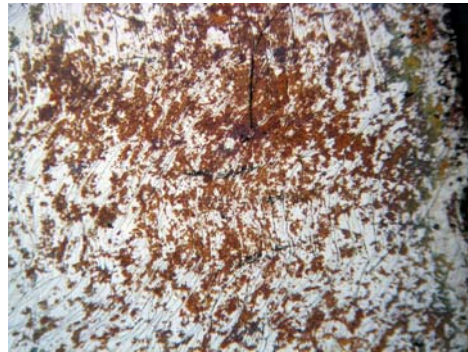


그림 56. 무처리 황철석 표면.

전자현미경(SEM)을 이용한 관찰결과 인산염으로 처리한 황철석의 표면에 2차 광물의 결정의 성장이 확인 되었으며(그림 57) EDX를 이용한 화학분석결과 철인산염으로 확인되었다(그림 58).

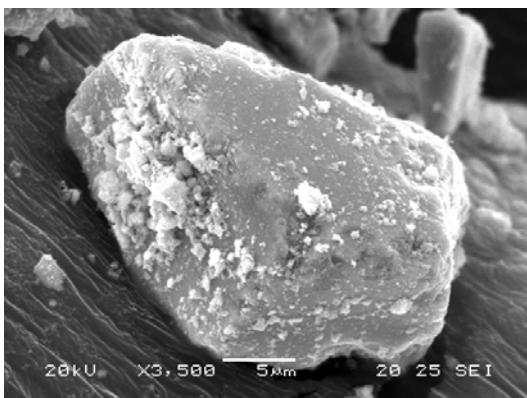


그림 57. 피막형성제로 처리한 황철석.

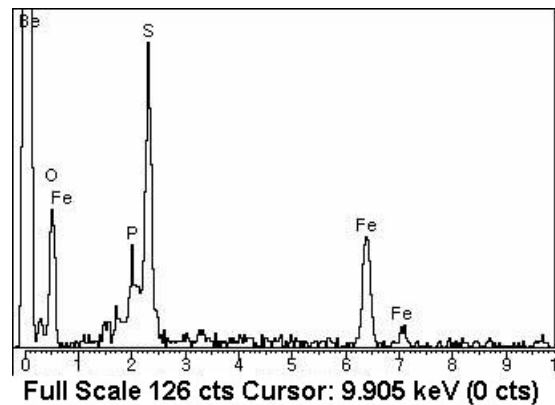


그림 58. EDX 화학분석 결과.

X-선 광전자 분광기를 사용하여 무처리 황철석, H_2O_2 로 강제 산화시킨 황철석 그리고 피막 처리된 황철석의 표면을 분석하였다. Fe, S 이외에 산화시킨 황철석은 O가 피막 처리된 황철석은 P가 검출되었다. 형성된 철인산염 피막의 두께를 알아보기 위해 시간대별로 아르곤 이온을 조사한 결과는 그림 59에 나와있다. 12초 동안 이온을 조사하여 황철석 표면으로부터 피막을 제거한 이후 인 피크가 소멸되어 피막의 두께는 약 $5\text{\AA}$ 으로 확인되었다(그림 60).

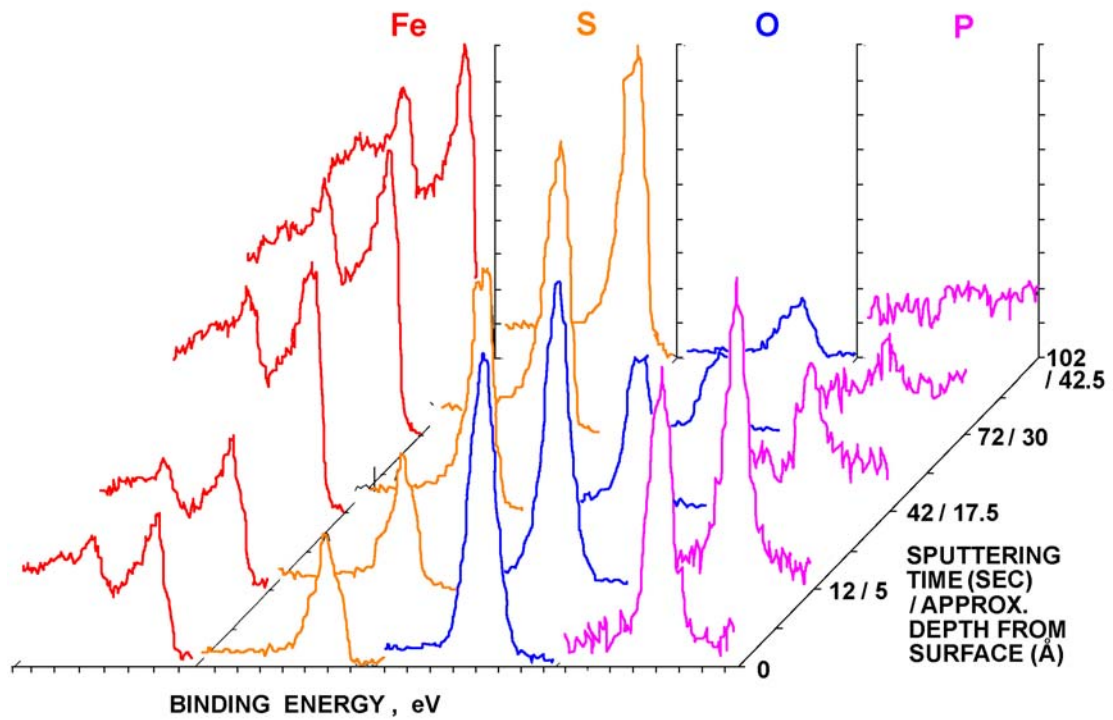


그림 59. 이온조사 시간에 따른 황철석 표면의 X-선 광전자 분광 스펙트럼 변화.

코팅처리 황철석 단면

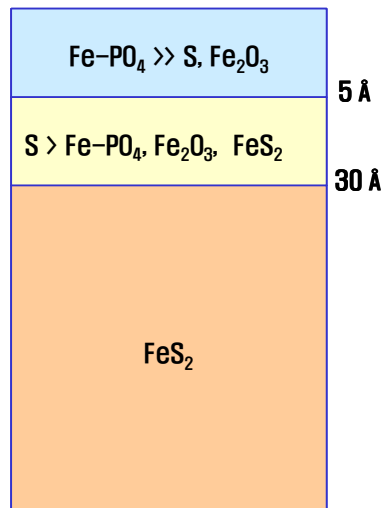


그림 60. 피막형성처리된 황철석 단면모식도.

제 9절. 암석유형별 최적 피막형성제 도출

1. 이론적 접근 방법

암석은 유형별로 광물조성과 황화광물의 종류 및 산출상태가 다양하다. 이러한 다양한 조건을 가진 암석으로부터 발생하는 산성암반배수의 량과 암석의 산에 대한 중화능력이 다르다. 또한 표준 황철석을 대상으로 도출된 최적 피막형성제를 현장 암석에 적용함은 많은 문제점이 발생할 것으로 판단된다. 따라서 다양 농도의 H_2O_2 , PO_4^{3-} 을 함유한 피막형성제로 우리나라의 대표적인 산성암반배수 발생 현장 암석을 대상으로 피막형성실험을 하여 각 유형별로 최적의 피막형성조건을 도출하여 현장에 적용하여야 한다.

2. 연구 방법

황철석이 많이 함유된 안산암(경남 양산시), 제3기퇴적암(경북 포항시), 변성암(충북 보은군), 석탄폐석(충남 금산군)을 cup mill로 미분하여 사용하였다. 암석의 황화광물함량은 LECO사의 유황분석기로 총 유황함량을 측정하여 FeS_2 함량으로 역산하였다. pH6이며 다양한 농도의 PO_4^{3-} (0.0001 - 0.01M KH_2PO_4)와 H_2O_2 (0.01 - 0.1M)를 함유한 피막형성제 200ml와 시료 2g을 24시간 반응시켰다. 각 암석의 산발생능력과 산에 대한 중화능력은 Acid Base Account Method를 이용하여 측정하였다(그림 61). 반응 후에 0.45 μ m membrane filter를 이용하여 거른 후 피막형성 정도를 알아보기 위하여 용액의 pH, Fe, 중금속, SO_4^{2-} 의 농도를 pH meter, ICP, IC를 이용하여 측정하였다. 반응 전과 후에 황철석을 전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다.



그림 61. 암석의 ABA test.

3. 결과

실험에 사용한 모든 암석은 산중화능력/최대산발생능력이 1이하로서 산성암반배수를 발생시킬 개연성이 높은 암석으로 판명되었다(표 16).

암석	광물조성	S함량(%)	MPA	NP	NAPP	NAG	NP/MPA
			----- Kg _{CaCO₃} /t -----				
안산암	Q,K	5.88	183.4	-6.4	189.8	142.1	-0.03
제3기 퇴적암	Q,M,F,S,K	1.36	42.5	29.8	12.7	10.0	0.70
변성암	Q,M,S,C	1.73	53.9	13.8	40.1	19.5	0.26
폐석탄	Q,F,S,K,G	8.89	277.6	4.3	273.3	104.9	0.02

표 16. 암석의 광물조성과 ABA test결과.

실험에 사용한 모든 암석시료는 반응용액의 H₂O₂의 농도가 증가하면 pH가 낮아지고 Fe와 SO₄²⁻의 농도가 증가하는 경향을 보여주었다(그림 62, 63, 64, 65). 용액의 PO₄의 농도가 증가할수록 pH가 증가하고 Fe와 SO₄²⁻의 농도가 감소하는 경향을 보여주었다. 용액의 SO₄²⁻의 농도는 암석에 함유된 황화광물의 산화지시인자로서 PO₄에 의하여 황화광물의 산화가 감소되었음을 의미한다. 또한 PO₄에 의하여 SO₄²⁻의 농도감소와 동시에 Fe의 농도감소는 산화가 저감되었을 뿐만 아니라 철인산염이 생성되었음을 의미한다. 황화광물 표면에 침전된 철인산염은 산소의 접촉을 차단하여 황화광물의 산화를 억제하는 것으로 판단된다. 또한 피막형성제에 함유된 H₂O₂는 1차적인 황화광물의 산화와 철인산염광물의 형성에 필요한 용존 철의 생성을 유발하여 철인산염 피막의 형성을 촉진하는 것으로 판단된다. 본 연구의 실험조건 중에서 모든 암석유형에 대하여 가장 효과적으로 황화광물의 산화를 억제하는 최적의 피막형성조건은 0.01M PO₄³⁻-0.01M H₂O₂로 판단된다.

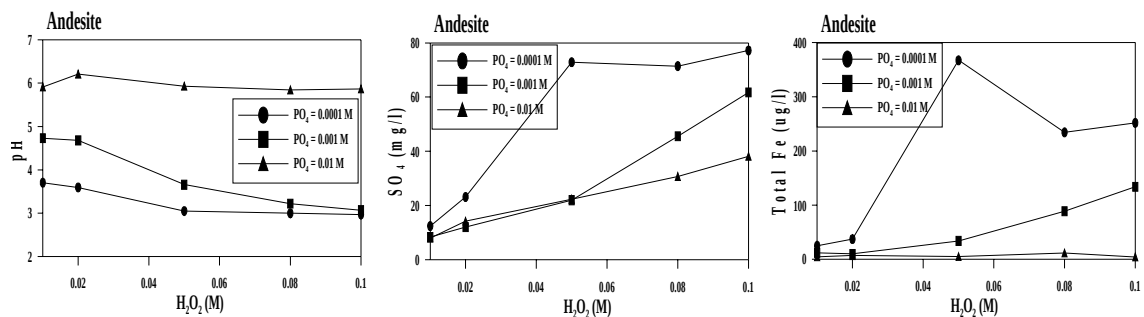


그림 62. 안산암과 피막형성제의 반응 후 용액의 pH, SO₄²⁻농도, Fe농도.

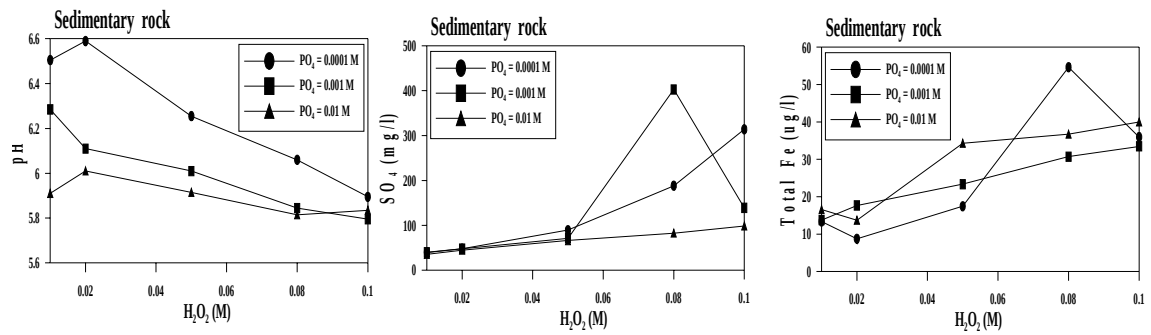


그림 63. 제3기 퇴적암과 피막형성제의 반응 후 용액의 pH, SO_4^{2-} 농도, Fe 농도.

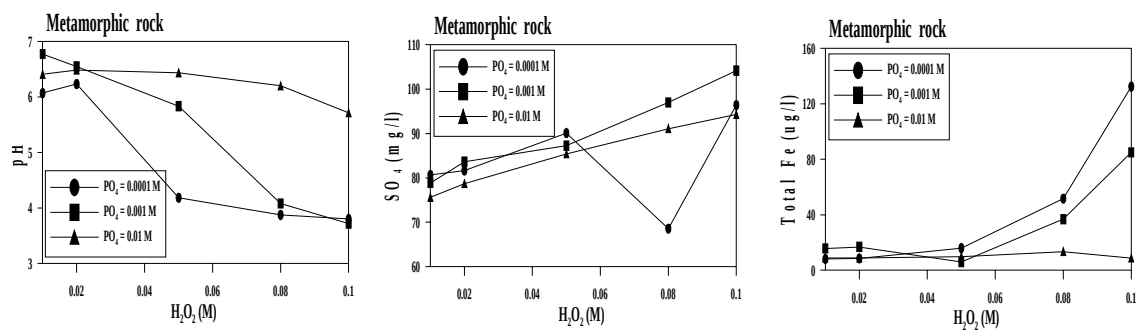


그림 64. 옥천층군 변성암과 피막형성제의 반응 후 용액의 pH, SO_4^{2-} 농도, Fe 농도.

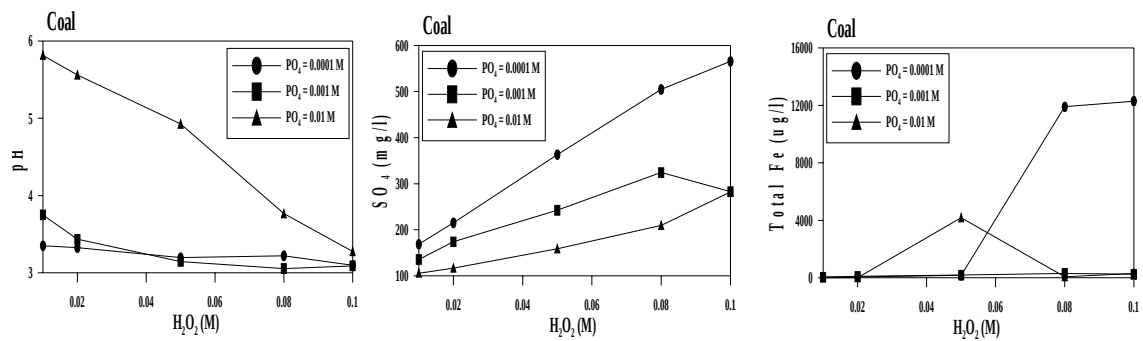


그림 65. 폐석탄과 피막형성제의 반응 후 용액의 pH, SO_4^{2-} 농도, Fe 농도.

SEM 전자현미경하에서 인산염으로 처리된 황철석의 표면에 철인산염의 피막이 형성되었음을 확인하였다(그림 66).

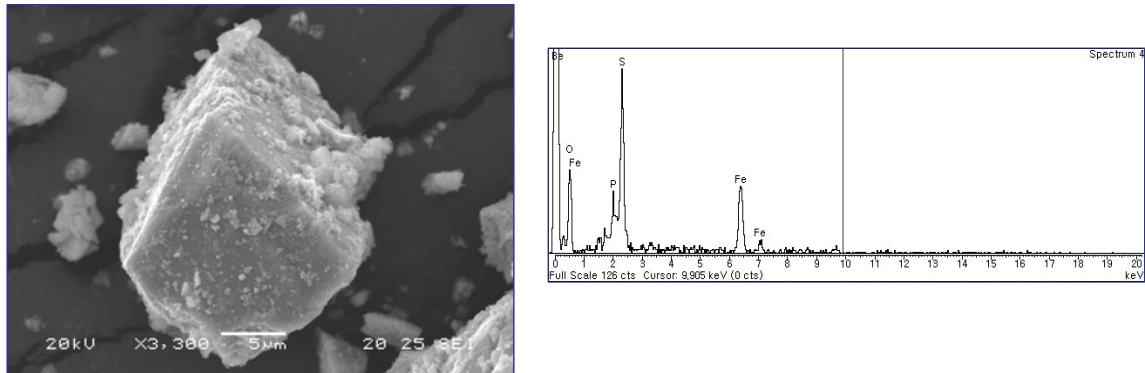


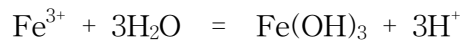
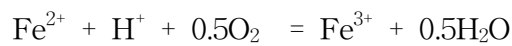
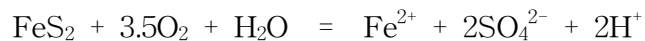
그림 66. 피막형성처리된 안산암의 황철석 SEM 사진과 EDX 화학자료.

제 10절. Silicate를 이용한 함황철석 암석의 피막형성

1. 이론적 접근방법

황철석의 산화는 주변의 pH 조건에 따라 2단계로 나눌 수 있다.

[1단계반응 : pH>3.5]



[2단계반응: pH<3.5]



1단계반응은 산화반응 초기에 pH가 3.5이하인 조건에서 일어나는 반응으로 O₂가 황철석의 주 산화제이다. 반면 2단계 반응은 1단계 반응이 충분히 진행되어 주변 pH가 3.5이하로 되면 Fe(OH)₃의 침전이 일어나지 않고 Fe³⁺가 황철석의 산화제로 작용하여 다량의 황산을 생성한다. 2단계 반응에서 Fe³⁺는 강력한 황철석 산화제로서 산성암반배수 발생의 주원인이 된다. 따라서 반응용액의 Fe³⁺의 화학적 활성도 (activity)를 저하시키면 2단계 반응에서 황철석 산화에 의한 산성암반배수의 발생을 저감시킬 수 있다.

Silicate는 철과 결합하여 Fe-silicate complex를 형성하는 것으로 알려져 있다. Fe³⁺와 silicate의 complex 형성은 산화제로서 Fe³⁺의 화학적 활성도를 크게 저하시켜 황철석의 산화에 따른 산성암반배수의 발생을 억제할 수 있다. 산화철 혹은 수산화철의 침전은 Si에 의한 Fe³⁺의 활성저감 뿐만 아니라 Fe³⁺를 반응용액으로부터 제거함으로써 황철석의 산화를 크게 저감할 수 있다. 반응용액으로부터 산화철 혹

은 수산화철의 침전은 주로 용액의 산화환원상태와 pH에 의하여 결정된다. 황철석은 표면의 전하가 주변의 pH조건에 따라 변하는 variable charge mineral이다. 황철석의 point of zero charge는 pH 1.5로 알려져 있다. 따라서 pH가 1.5 이하에서 황철석의 표면은 양전하를 가지며 1.5 이상에서 음전하를 가진다. 대부분의 산성배수는 pH 1.5 이상이며 이러한 조건에서 황철석의 표면은 음전하를 가진다. 황철석의 산화과정에서 용출되는 Fe^{3+} 는 음전하를 가지는 황철석 표면에 흡착되게 된다. 황철석 표면에 흡착된 Fe^{3+} 는 주변의 pH가 3.5 이상이 되면 산화철 혹은 수산화철 광물로 침전된다. 황철석 표면은 산화철광물의 침전에서 결정이 성장하는 시점이 된다. 황철석 표면에 침전된 산화철광물은 황철석과 산소의 접촉을 차단하는 피막으로 작용한다. 본 실험에서 pH 6 Na-OAc buffer와 Si용액을 처리제로 사용하여 Fe^{3+} 의 활성도를 저하시키고 황철석 표면에 산화철 피막을 형성시켜 황철석의 산화를 억제하는데 목적이 있다.

2. 연구방법

경남 양산지역에 산출되는 황철석을 많이 함유한 중생대 안산암을 대상으로 분말화하여 황철석의 산화저감실험을 수행하였다. 안산암은 석영, 장석, 운모, 고령석, 황철석이 주구성광이며 황철석의 함량은 8.3%이다. 안산암의 최대 산발생량(MPA)은 $183.38\text{kgCaCO}_3/\text{ton}$ 이며 산에 대한 중화능력은 $-6.4\text{kgCaCO}_3/\text{kg}$ 이다. 산화철 표면코팅, 철규산염 complex 형성, 산화철 표면코팅 및 철규산염 complex 형성에 의한 각각의 황철석의 산화억제효율을 시험하였다. 산화철 표면코팅에 pH 6_0.01M NaOAc 용액, 철규산염 complex형성에 Na-silicate 용액, 산화철 표면코팅 및 철규산염 complex형성에는 pH6_0.01M NaOAc, Na-silicate 용액을 처리제로 사용하였다. 각 처리제는 산화촉진제로 H_2O_2 를 사용하였다. 각 처리제와 암석분말을 반응시킨 후 황철석의 산화저감효과를 알아보기 위하여 용액의 pH, Fe농도, SO_4^{2-} 농도를 측정하였다. 표면처리제는 H_2O_2 (0.01, 0.02, 0.05, 0.08, 0.1M), H_2O_2 _silicate(0.0001, 0.001, 0.01M), H_2O_2 _pH 6 Na-OAc buffer, H_2O_2 _silicate_ pH 6 Na-OAc buffer 용액을 사용하였다. 용액의 pH는 Orion pH meter, Fe와 Si농도는 ICP, SO_4^{2-} 농도는 IC를 이용하여 측정하였다.

3. 연구결과

반응용액의 종류별 반응 후의 화학적 특성은 표17과 같다.

H ₂ O ₂				
H ₂ O ₂ (M)	Na-silicate(M)	Final pH	Total Fe($\mu\text{g}/\ell$)	SO ₄ (mg/ ℓ)
0.01	0	3.55	502.00	60.75
0.02	0	3.35	1045.00	129.87
0.05	0	3.02	4434.00	279.41
0.08	0	2.86	8910.00	407.10
0.1	0	2.79	12100.00	506.73
Na-silicate & H ₂ O ₂				
H ₂ O ₂ (M)	Na-silicate(M)	Final pH	Total Fe($\mu\text{g}/\ell$)	SO ₄ (mg/ ℓ)
0.01	0.0001	3.52	618.00	94.05
0.02	0.0001	3.30	1275.00	128.06
0.05	0.0001	3.15	2211.00	165.53
0.08	0.0001	2.86	8195.00	285.53
0.1	0.0001	3.10	6118.00	223.96
0.01	0.001	3.49	805.50	120.42
0.02	0.001	3.28	1637.00	132.54
0.05	0.001	3.14	2628.00	158.93
0.08	0.001	2.83	9210.00	280.65
0.1	0.001	2.78	12509.00	330.37
0.01	0.01	3.45	1282.00	123.18
0.02	0.01	3.27	5490.00	101.39
0.05	0.01	2.98	22860.00	156.94
0.08	0.01	2.84	18430.00	238.23
0.1	0.01	2.80	31704.00	221.63
pH 6_NaOAC & H ₂ O ₂				
H ₂ O ₂ (M)	Na-silicate(M)	Final pH	Total Fe($\mu\text{g}/\ell$)	SO ₄ (mg/ ℓ)
0.01	0	5.83	9.93	20.07
0.02	0	5.79	11.25	30.27
0.05	0	5.70	13.65	45.50
0.08	0	5.65	18.05	65.25
0.1	0	5.62	19.65	74.15
Na-silicate, pH 6_NaOAC & H ₂ O ₂				
H ₂ O ₂ (M)	Na-silicate(M)	Final pH	Total Fe($\mu\text{g}/\ell$)	SO ₄ (mg/ ℓ)
0.01	0.0001	5.85	12.90	16.08
0.02	0.0001	5.81	12.10	20.58
0.05	0.0001	5.75	14.10	29.17
0.08	0.0001	5.70	16.00	38.75
0.1	0.0001	5.64	19.00	46.43
0.01	0.001	5.84	115.50	18.74
0.02	0.001	5.79	206.50	20.91
0.05	0.001	5.72	304.50	30.80
0.08	0.001	5.67	276.50	35.60
0.1	0.001	5.64	160.50	34.94
0.01	0.01	5.87	334.00	13.76
0.02	0.01	5.82	384.50	16.49
0.05	0.01	5.75	624.50	22.85
0.08	0.01	5.70	768.00	29.19
0.1	0.01	5.66	757.00	33.18

표 17. 반응용액의 화학적 특성.

모든 용액에서 H_2O_2 의 농도가 증가 할수록 pH가 떨어지고 Fe와 SO_4^{2-} 의 농도가 증가하였다(그림 67). H_2O_2 의 농도가 증가하면 황철석의 산화가 증가되어 H^+ 농도가 증가하여 pH가 떨어지고, 황철석의 풍화산물인 Fe와 SO_4^{2-} 의 농도가 증가하는 것으로 판단된다. SO_4^{2-} 농도와 Fe농도의 정의 상관관계는 황철석의 산화에 따른 Fe와 SO_4^{2-} 의 농도 증가를 의미한다(그림 68).

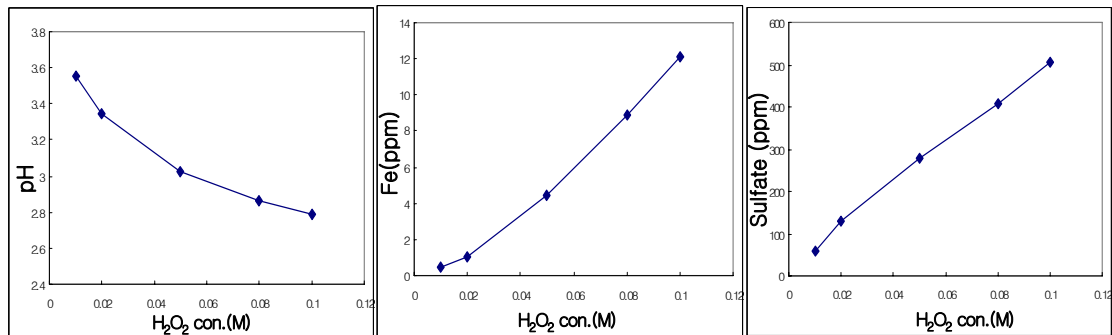


그림 67. H_2O_2 처리제의 H_2O_2 농도변화에 따른 pH, Fe농도, SO_4^{2-} 농도 변화.

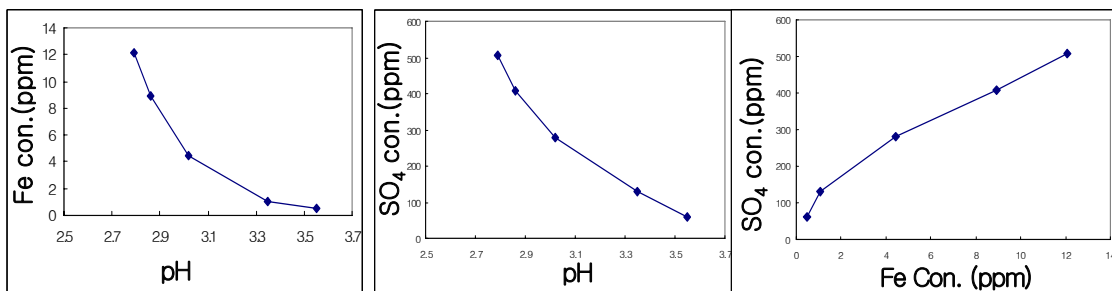


그림 68. pH vs. Fe농도, pH vs. SO_4^{2-} 농도, Fe농도 vs. SO_4^{2-} 농도.

Na-silicate- H_2O_2 용액과 반응 후에 용액의 pH는 H_2O_2 용액과 반응 후와 비슷한 경향을 보여주었으나, 동일한 H_2O_2 농도에서 silicate에 의하여 SO_4^{2-} 농도는 감소하였으며 Fe농도는 증가하였다(그림 69). Silicate에 농도증가에 의한 SO_4^{2-} 농도의 감소는 Si에 의하여 황철석의 산화가 저감되었음을 의미한다. Si는 Fe와 complex를 형성하여 Fe^{3+} 의 활성도를 저감시켜 황철석의 산화를 저감시키고 그에 수반되어 용액의 SO_4^{2-} 의 농도를 낮춘 것으로 판단된다. Silicate 농도의 증가에 따른 Fe농도의 증가는 Fe가 silicate와 complex를 형성하여 산화철광물의 침전을 저해하여 나타난 현상으로 판단된다.

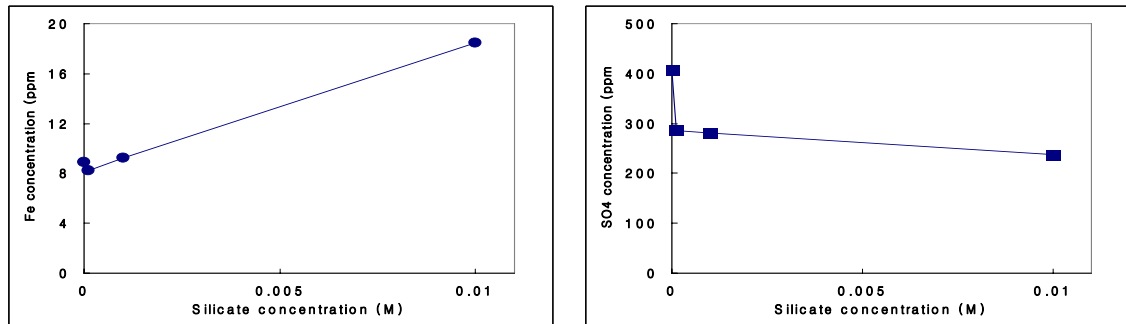


그림 69. Si농도와 Fe 및 SO_4^{2-} 농도의 상관관계.

pH 6 Na-OAc가 반응용액에 존재하면 Fe^{3+} 가 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 혹은 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 으로 침전되어 용액의 Fe농도가 낮아짐을 알 수 있다(그림 70). 또한 buffer에 의한 SO_4^{2-} 농도 저하는 buffer에 의하여 황철석의 산화가 억제됨을 의미한다. Buffer에 의한 Fe농도 및 SO_4^{2-} 농도의 저하는 Fe^{3+} 의 침전에 의하여 황철석의 산화제로서 Fe^{3+} 의 활성도가 낮아졌음을 의미한다. 또한 전자현미경관찰에 의하면 황철석 표면에 goethite로 추정되는 산화철광물의 침전이 관찰되었다. 황철석 표면에 침전된 산화철광물은 산소와 황철석의 접촉을 차단하는 피막으로 작용하여 황철석의 산화를 저감시킨 것으로 판단된다.

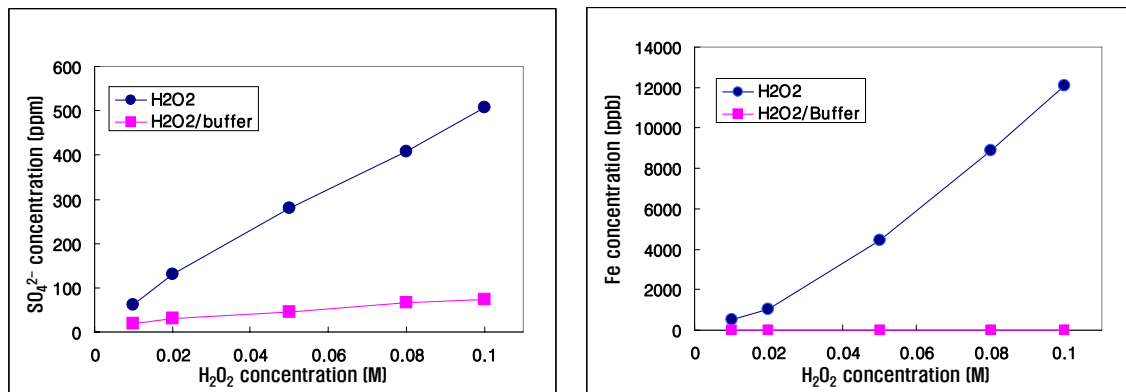


그림 70. pH 6 Na-OAc buffer에 의한 황철석의 산화억제.

Buffer와 silicate모두 황철석의 산화를 억제하는 것으로 나타났으며 buffer와 silicate가 모두 포함된 처리제가 황철석의 산화를 보다 효과적으로 억제하는 것으로 나타났다(그림 71). 또한 Na-OAc buffer와 Si가 모두 함유된 반응용액에서 Si는 용액의 Fe의 활성도를 저감시키는 것뿐만 아니라 용액의 Fe 농도를 증가시키는 것으로 나타났다.

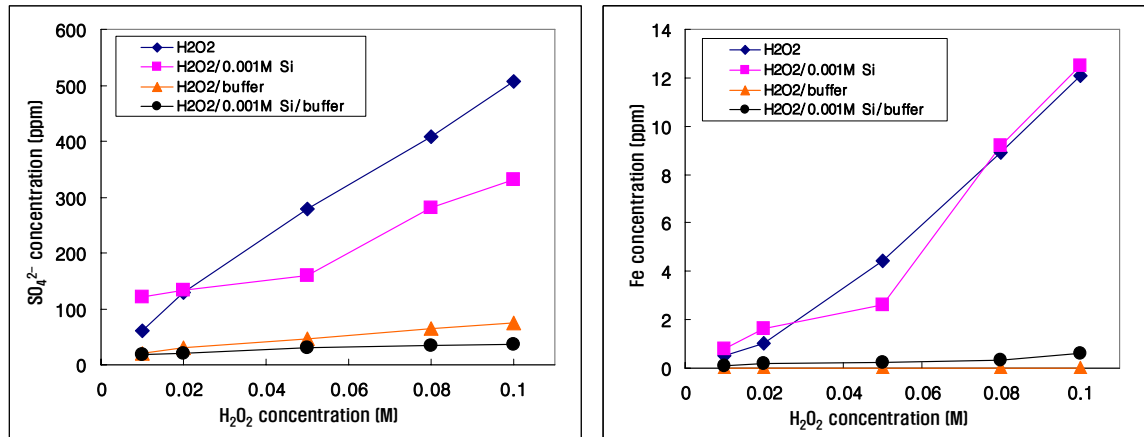


그림 71. Buffer, Si에 의한 반응 후 용액의 Fe와 SO_4^{2-} 의 농도변화.

반응 후 용액의 중금속 농도는 용액의 SO_4^{2-} 농도에 비례하며 As, Zn, Cu, Cr, Ni, Cd 등 중금속의 농도는 환경기준치 이하였다. As와 Al의 농도는 반응용액의 Si 농도에 비례하였다(그림 72). As는 수용액에서 음이온 complex로 존재하며 silicate와 흡착 site에 대하여 서로 경쟁한다. 따라서 용액의 Si농도가 증가함에 따라 silicate에 의하여 arsenate 혹은 arsenite가 광물입자로부터 탈착이 일어나게 된다. Silicate에 의한 arsenate 혹은 arsenite의 탈착은 용액의 As 농도 증가를 야기한다. Si에 의한 Al농도의 증가는 silicate가 Al과 complex를 형성하여 Al화합물의 침전을 방해하는 것으로 추정된다.

처리되지 않은 황철석은 자형 혹은 반자형으로 모서리가 비교적 sharp하다(그림 73). 반면 H_2O_2 용액 및 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{buffer}$ 용액과 반응한 황철석은 모서리의 roundness가 크게 관찰되었다. $\text{H}_2\text{O}_2/\text{buffer}$ 용액으로 처리한 안산암의 황철석 표면에서 goethite로 추정되는 산화철광물이 관찰되었다. $\text{H}_2\text{O}_2/\text{buffer_Si}$ 용액과 반응한 안산암에 함유된 황철석의 모서리는 반응시키지 않은 황철석의 모서리와 같이 sharp하게 관찰되었다. 또한 표면의 EDX 자료는 황철석의 표면에 Si화합물의 침전을 지시하는 Si peak가 관찰되었다.

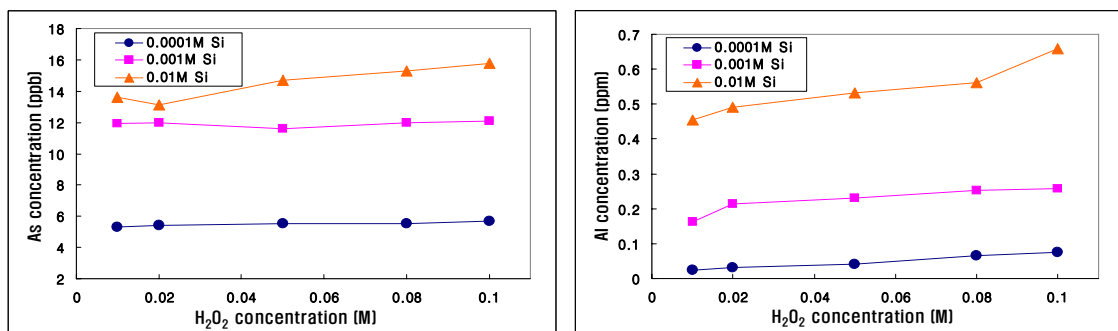


그림 72. Si와 H_2O_2 에 의한 As와 Al의 농도변화.

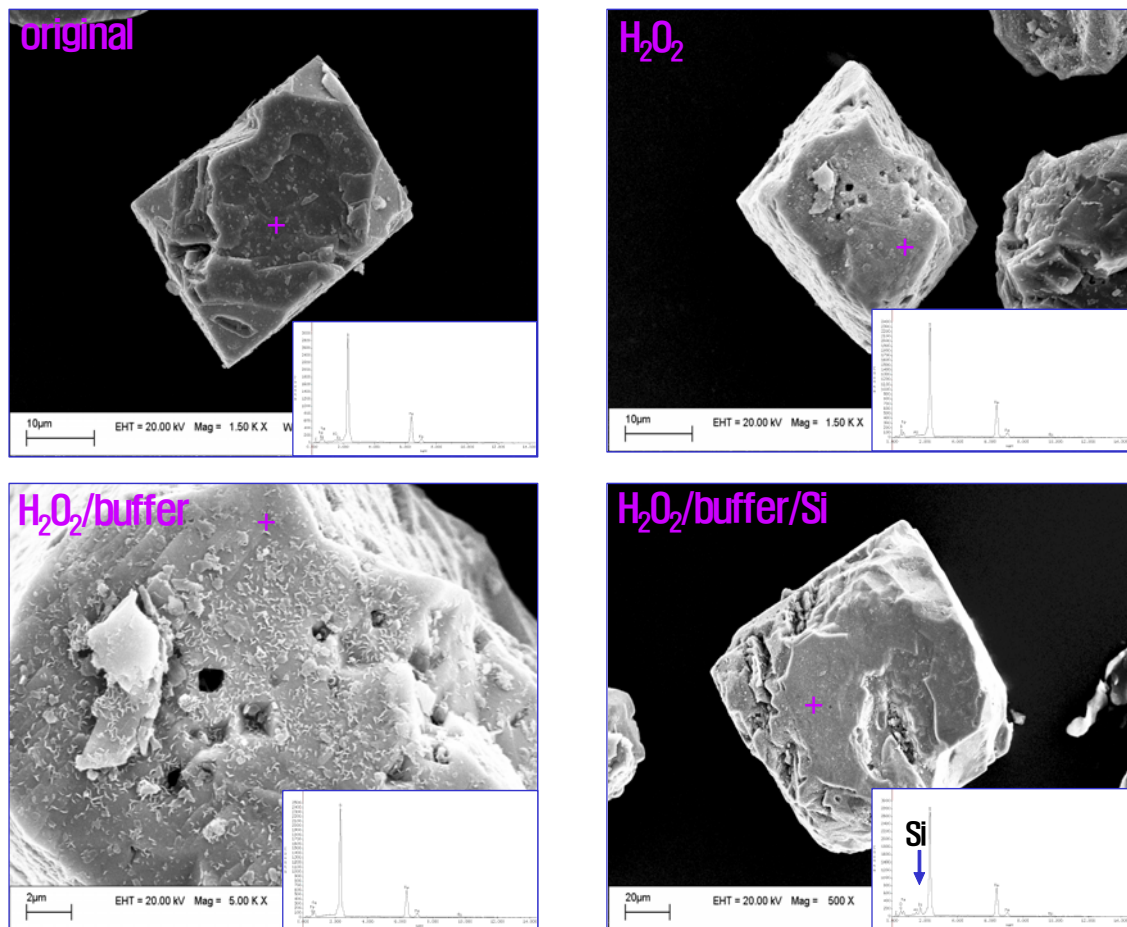


그림 73. 반응전과 다양한 반응용액과 반응 후 황철석 전자현미경사진과 화학조성.

제 11절. 피막형성제가 콘크리트 강도에 미치는 영향

1. 이론적 접근방법

산성암반배수가 발생될 개연성이 높은 사면과 굴착암석에 대한 피막형성기술의 적용은 표면에 노출된 황화광물의 산화가 가장 적게 진행된 때인 사면굴착 직후에 적용하는 것이 가장 바람직하다. 피막형성기술의 적용 후에 사면구조물, 식생피복 등 다양한 후속 작업이 현장에서 진행된다. 피막형성제는 화학제로서 H_2O_2 , Na-acetate, PO_4^{3-} 를 함유하고 있다. 이러한 화학약품은 환경적으로 안정하고 철재 구조물의 부식을 저감하는 것으로 알려져 있다. 반면 콘크리트의 강도에 미치는 영향에 대한 자료가 부족하여 피막형성처리 후에 수반되는 사면의 콘크리트 구조물의 설치에 미치는 영향은 파악되고 있지 않다. 사면에 살포된 피막형성제는 피막형성이 이루어지고 난후에도 일부가 사면에 잔존할 개연성이 높다. 이러한 잔존 피막형성제가 콘크리트의 강도에 미치는 영향을 파악하여 대책을 수립함으로서 피막형

성처리에 따른 역효과를 사전에 방지할 수 있다.

2. 실험 방법

콘크리트 강도시험용 주문진 표준사(48%), 포틀랜드 시멘트(39%), 피막형성제를 함유한 수돗물(13%, 피막형성제 농도: 0, 25, 50, 75, 100%)을 배합하여 플라스틱재질의 통에 성형하고 28일간 양생하였다(그림 74). 28일간 양생 후에 직경 32mm, 길이 60mm의 원주형의 피막형성제의 농도별로 3개의 코어를 채취하여 일축압축강도를 측정하였다.



그림 74. 콘크리트 성형.

3. 연구 결과

피막형성제의 농도가 0%인 경우 코어의 일축압축강도는 56MPa, 피막형성제가 첨가된 경우에는 48 - 50MPa의 강도를 나타내었다(그림 75). 피막형성제에 의하여 콘크리트 코어의 강도가 약 10% 정도 감소되었음을 알 수 있다. 이는 피막형성제에 함유된 PO_4^{3-} 가 시멘트에 함유된 Ca와 반응하여 칼슘인산염(calcium phosphate) 광물의 형성에 의한 것으로 추정된다.



칼슘인산염이 콘크리트의 강도에 미치는 영향을 정량적으로 연구한 결과가 없어 정확한 영향을 추정하기는 매우 어려운 실정이다. 따라서 향후 추가 연구가 요구되는 분야이다. 현장에서 피막형성처리를 추정하면 피막형성제가 액체상태로 사면에 잔존하여 후속 공사인 슛크리트, 사면 구조물 등의 설치에 미치는 영향은 극히 적을 것으로 판단된다.

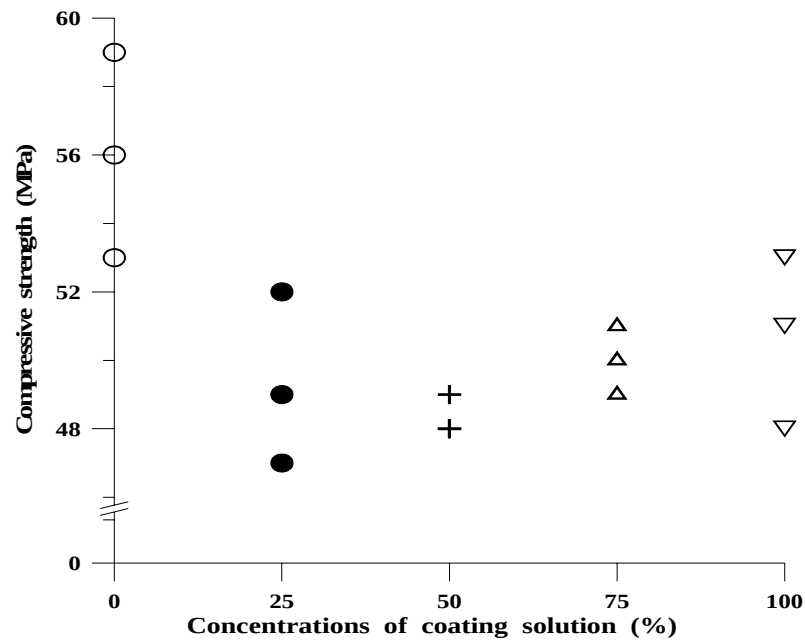


그림 75. 피막형성제 농도별 콘크리트의 일축압축강도 변화.

제 12절. 피막형성 처리를 이용한 특이산성토 식생피복

1. 이론적 접근방법

다량의 황화광물을 함유 암석 혹은 토양이 절취사면과 성토사면의 존재하면 빗물 혹은 지하수와 반응 하여 황화광물이 산화되면서 산성암반배수를 발생시킨다. 사면에서 발생한 산성암반배수는 사면과 주변지역을 산성화시키고 중금속으로 오염시킨다. 사면의 산성화와 중금속 오염은 식생의 발아 및 성장에 악영향을 미쳐 사면의 식생피복을 불량하게 한다. 사면식생피복의 불량은 사면의 풍화와 침식을 촉진시키며 경관에 악영향을 미친다. 사면풍화와 침식의 촉진은 사면의 안정성을 저해하고 사면의 유기관리비용의 증가를 유발한다.

최근 환경친화적인 건설공사의 일환으로 대부분의 절취 및 성토 사면을 대상으로 녹화를 시행하고 있다. 산성암반배수가 발생하는 사면에서 사면녹화를 식생공의 적용이 실패하는 사례가 많이 보고되고 있다(그림 76).



그림 76. 산성암반배수가 발생하는 성토사면과 절취사면에 적용된 식생공의 실패 사례.

사면의 원활한 식생피복을 위하여 생석회를 살포하여 발생하는 산성배수를 중화시키는 공법이 일부지역에서 시행되고 있으나 발생하는 산성암반배수의 양이 많을 경우에는 실패하는 사례가 보고되고 있다. 또한 일부 암반사면에서는 식생점토의 두께를 늘여서 시공하거나 성토사면에서는 부식토 혹은 산성배수가 발생되지 않는 토양으로 복토하는 공법이 적용되고 있다. 부식토와 복토의 첨가는 식생피복을 위한 비용증가로 귀결된다. 따라서 근원적으로 산성암반배수의 발생을 억제하고 경제적인 공법의 개발 및 시공이 필요하다.

산성암반배수를 발생시킬 개연성이 있는 토양 혹은 암석을 표면피막형성 처리를 하여 산성암반배수의 발생을 억제함으로써 토양 및 암석 사면의 산성화를 방지함으로써 원활한 식생의 발아 및 성장을 촉진시킨다.

2. 실험 방법

특이산성토(40%), 함황철석 안산암분말(20%), 모래(40%) 혼합토양 4.5kg을 내경 20cm, 깊이 25cm의 PVC 화분에 채우고 증류수(4회), 0.01M H_2O_2 용액(4회), 0.01M H_2O_2 -0.01M KH_2PO_4 pH 6 용액(1회+증류수 3회, 2회+증류수 2회, 3회+증류수 1회, 4회) 1L로 처리하였다(그림 77). 각 처리별로 3반복의 화분을 사용하였다. 전처리 후 각 화분에 320개의 ryegrass를 표면에 뿌리고 특이산성토로 얇게 피복하였다. 식생발아 및 성장 실험은 관수조절을 위하여 온실에서 실시하였다. 파종 후 1주일 후에 발아율을 측정하였다. 발아율 측정 후에 1주일 간격으로 1L의 수돗물을 뿌리고 침출수를 회수하여 분석하였다(그림 78). 침출수는 0.45 μ m membrane filter를 이용하여 거른 후 pH, EC, 양이온 함량, 음이온 함량을 pH/EC meter, ICP, IC를 이용하여 분석하였다. 3개월의 실험 후 식생의 성장상태를 파악하기 위하여 ryegrass를 화분으로부터 회수하여 뿌리와 잎의 길이를 측정하고 60 $^{\circ}$ C 오븐에서 건조 후 무게를 측정하였다. 화분으로부터 ryegrass의 회수과정에 화분토양을 깊이

별(3cm 간격)로 채취하여 유효인산함량, pH, EC, 수용성 양이온 함량, 수용성 음이온 함량을 측정하였다.



그림 77. 온실 제작.



그림 78. 화분설치.

3. 연구 결과

각 처리별로 ryegrass의 발아율은 큰 차이가 없었으며 약 80% 정도의 발아율을 나타내었다(그림 79). Ryegrass의 발아는 토양의 화학적 특성보다 수분함량과 온도에 의하여 좌우됨으로 처리별 발아율의 차이가 없을 것으로 판단된다.

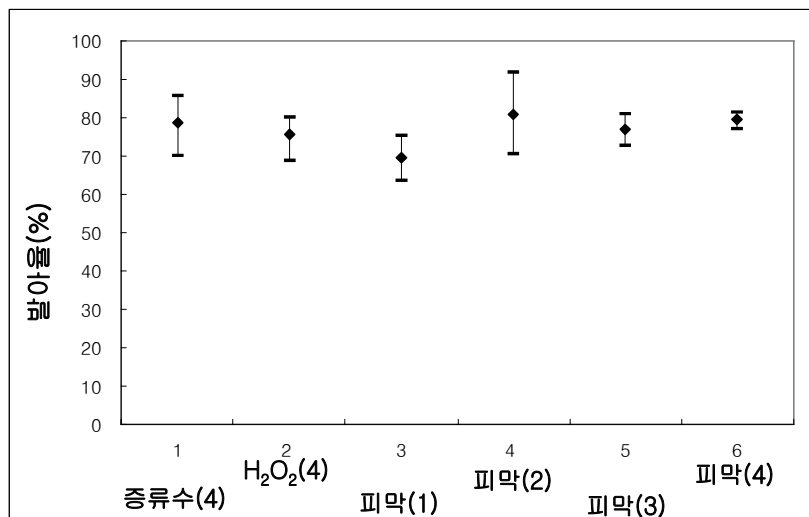


그림 79. 처리별 ryegrass의 발아율.

처리별 ryegrass의 성장은 큰 차이를 보였다. 증류수와 H₂O₂로 처리한 토양에서 ryegrass의 성장은 피막형성제로 처리한 토양보다 현격히 저하되었다. 인산염피막

형성제의 처리횟수는 다른 식생의 성장은 차이가 없으며 증류수와 H_2O_2 처리에 비해 성장률이 약 5배정도 높은 것으로 나타났다. 증류수와 H_2O_2 로 처리한 화분의 ryegrass는 파종 후 약 2달 후에 고사상태가 되었다(그림 80, 81). 반면 피막형성제 처리한 화분의 ryegrass는 생장상태가 양호하였다. 피막형성제 처리한 화분의 ryegrass는 잎의 길이와 넓이가 증류수와 H_2O_2 처리 화분의 ryegrass보다 2배 이상 크다(그림 82).

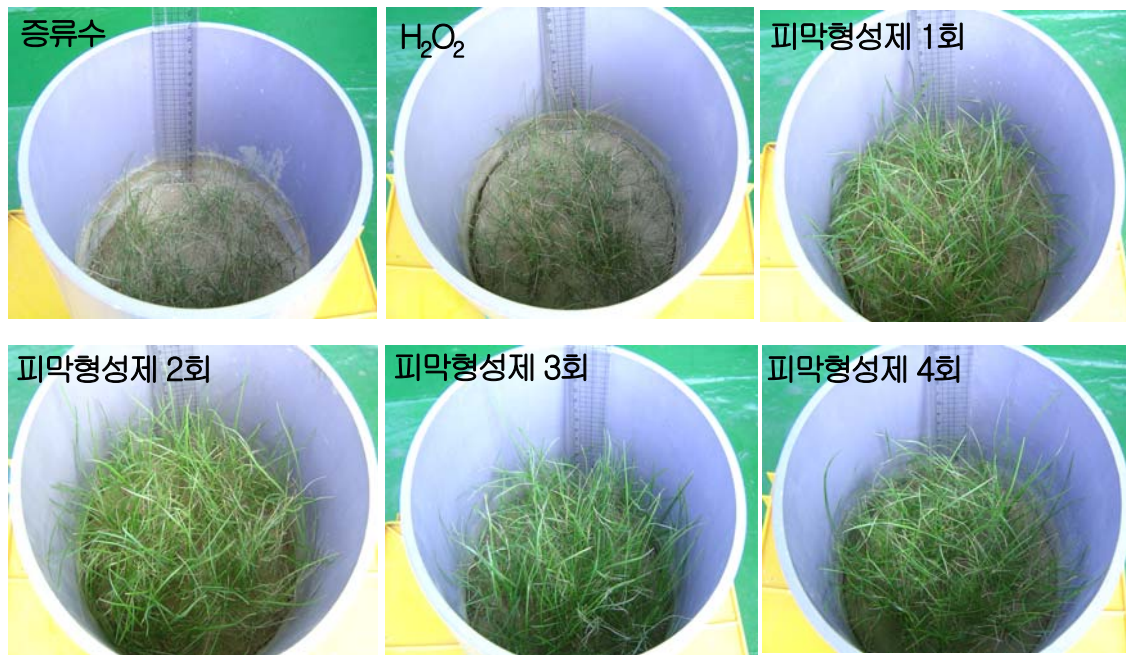


그림 80. 파종 2달 후 처리별 ryegrass의 성장상태.

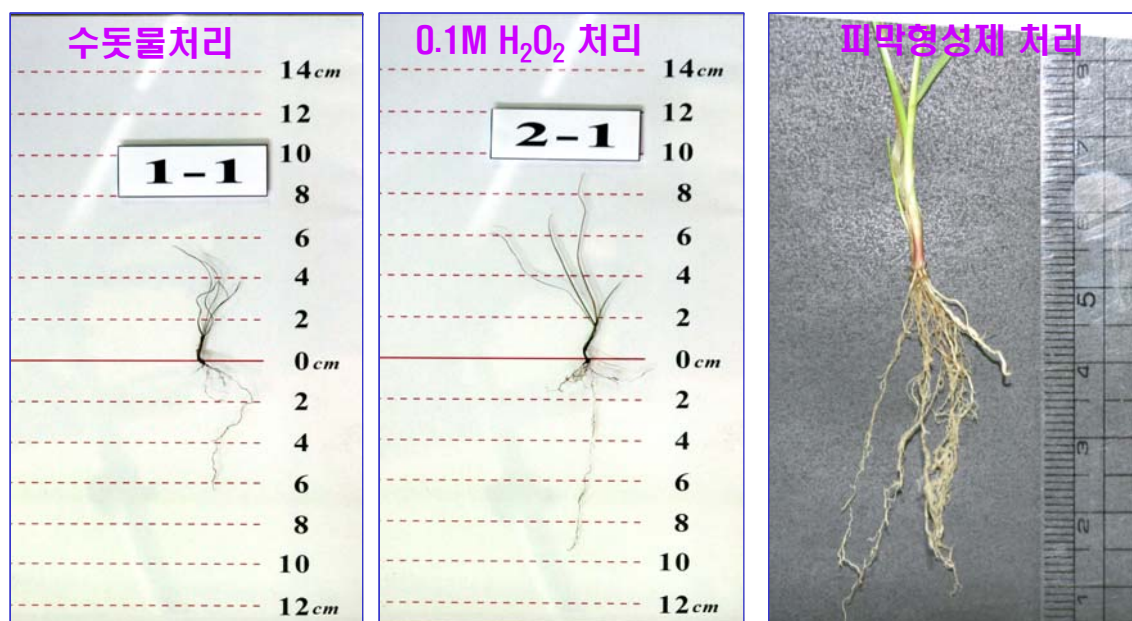


그림 81. 파종 2개월 후 처리별 ryegrass의 뿌리와 잎의 성장상태.

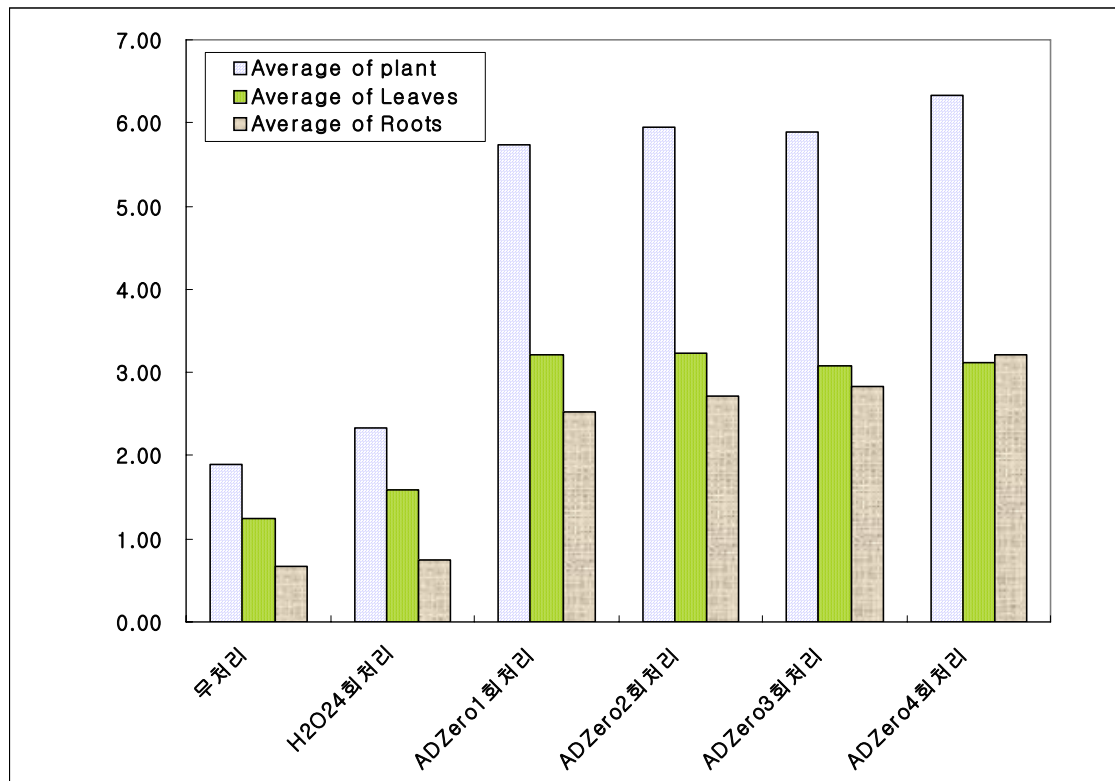


그림 82. 처리별 ryegrass의 biomass.

침출수의 pH는 피막처리 4회 > 피막처리 3회 > 피막처리 2회 > 피막처리 1회 > H₂O₂ 용액처리 > 증류수처리 순으로 나타났다(그림 83). 침출수의 EC, 양이온 함량, 음이온함량은 pH와 비례하는 경향을 나타내었다. 증류수와 H₂O₂처리 화분의 침출수는 식생의 성장에 지장을 줄 수 있는 pH는 4.5이하로 나타났다. 피막처리 화분의 침출수의 높은 pH, EC, 양이온과 음이온의 함량은 피막처리에 의하여 토양에 함유된 황철석의 산화가 억제되었음을 의미한다. 피막처리에 의한 토양 황철석의 산화억제는 토양의 적정 pH를 유지시켜 식생성장에 H⁺에 의한 장애를 방지하였다. 침출수의 pH는 SO₄²⁻의 농도와 반비례하고 EC와는 비례하는 경향을 나타내었다. 황철석의 산화는 생성된 침출수의 SO₄²⁻농도를 증가시키고 pH를 저하시키며 광물의 용해도를 증가시켜 침출수의 EC를 증가시킨 결과로 판단된다. 피막처리의 횟수가 증가할 수록 침출수의 인의 농도가 증가하였다.

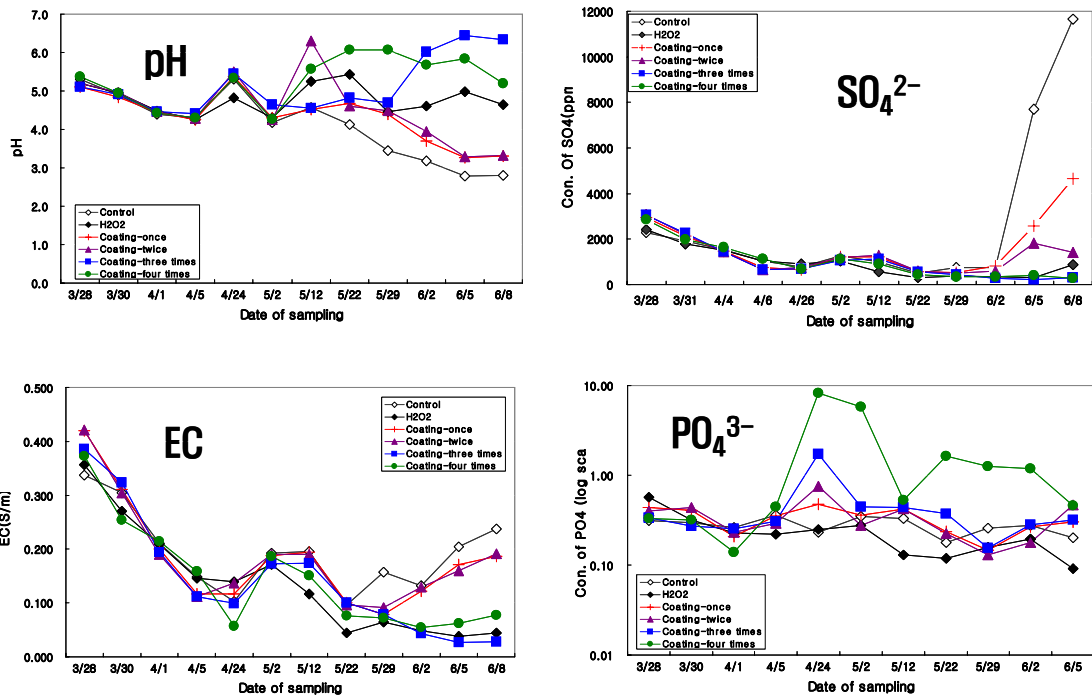


그림 83. 침출수의 pH, EC, 수용성 SO_4^{2-} 와 PO_4^{3-} 의 농도.

토양의 수용성 SO_4^{2-} 의 함량은 토양 pH와 반비례하는 경향을 나타내었다. 토양의 pH는 무처리 < H_2O_2 처리 < 피막1회 < 피막2회 < 피막3회 순으로 나타났다(그림 84). 피막 처리한 토양은 깊이가 증가할 수록 pH가 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 피막 처리가 토양에 표층에 주로 이루어졌음을 의미한다. 또한 수용성 SO_4^{2-} 와 PO_4^{3-} 는 표층에서 높고 하부로 갈수록 증가하는 경향을 나타내었다.

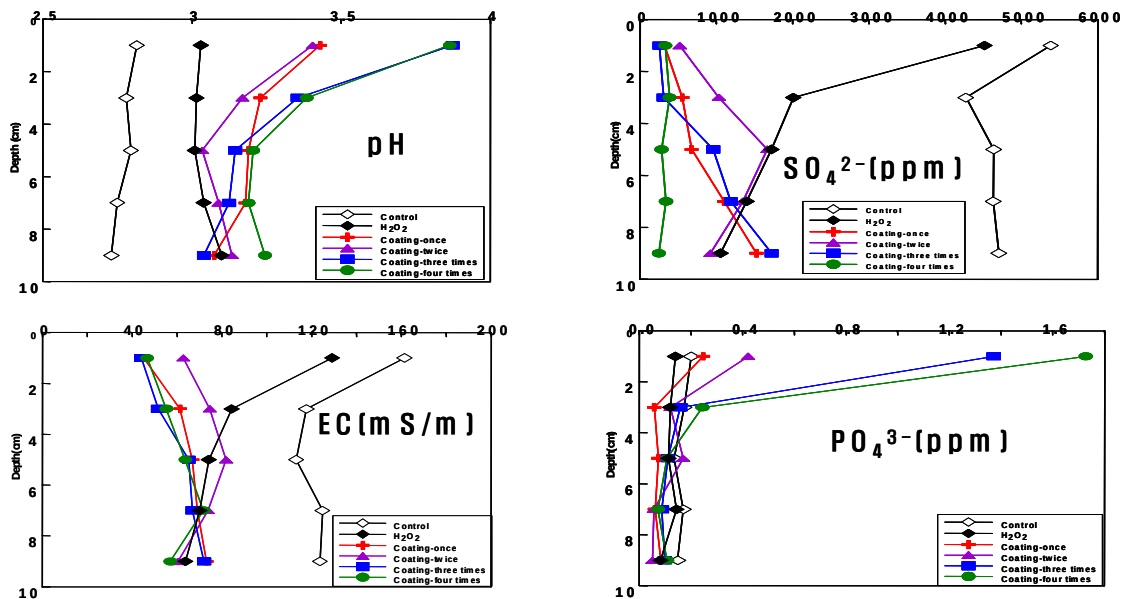


그림 84. 처리별 토양 깊이에 따른 pH, EC, SO_4^{2-} 와 PO_4^{3-} 의 농도.

제 13절. 코팅처리를 이용한 산성배수 발생 절취 흙사면의 자연식생 피복촉진

1. 이론적 접근

연구대상사면은 절취 후에 10년 정도 경과한 사면으로서 절토직후에 seed spray를 이용한 식생공을 적용하였으나 부분적으로 산성암반배수의 발생량이 많아 식생의 활착이 이루어지지 않아 사면토사의 침식이 발생하고 있으며 현재에도 식생피복에 많은 어려움이 있는 사면이다. 사면에 존재하는 암편은 황철석을 많이 함유하고 있는 변성퇴적암으로서 지속적으로 산성암반배수가 발생되고 있다. 일부분에서 잡초가 자라고 있으나 산성암반배수에 의하여 성장상태가 매우 불량하여 발아와 고사가 반복되고 있다. 따라서 사면에 피막형성제를 살포하여 암편으로부터 산성암반배수의 발생을 근원적으로 억제하고 주변지역 자생식생의 활착을 유도하여 사면을 식생으로 피복함으로써 사면의 안정성을 증진하고 경관을 회복할 필요성이 있다.

2. 실험방법

연구대상 사면에서 지하수 발생, 식생피복상태, 암편의 량, 침식정도 등 비슷한 조건을 갖춘 2곳을 선정하여 구획하였다. 2section 모두 지하수의 seeping이 발생하는 곳으로서 일반지하수보다 pH가 약간 낮은 5.8 - 6.0을 나타내었다. 사면의 약산성 지하수는 중성의 암반지하수가 사면으로 흐르면서 사면의 함황철석 암편과 반응하여 산성암반배수를 발생시켜 나타난 현상으로 판단된다. Section1은 처리하지 않고 section2는 0.01M H_2O_2 -0.01M KH_2PO_4 -0.01M NaOAc를 살포하였다(그림 85). 피막형성제 살포 후 자연식생의 활착 및 성장상태를 정기적으로 관찰하고 기록하였다.



그림 85. Section과 피막형성제 살포.

3. 연구결과

피막형성제 살포 후 각 section의 식생상태를 관찰한 결과 피막처리에 의하여 식생의 성장속도가 많이 증가하였으며 사면에서 식생의 피복면적이 증가하였다(그림 86).

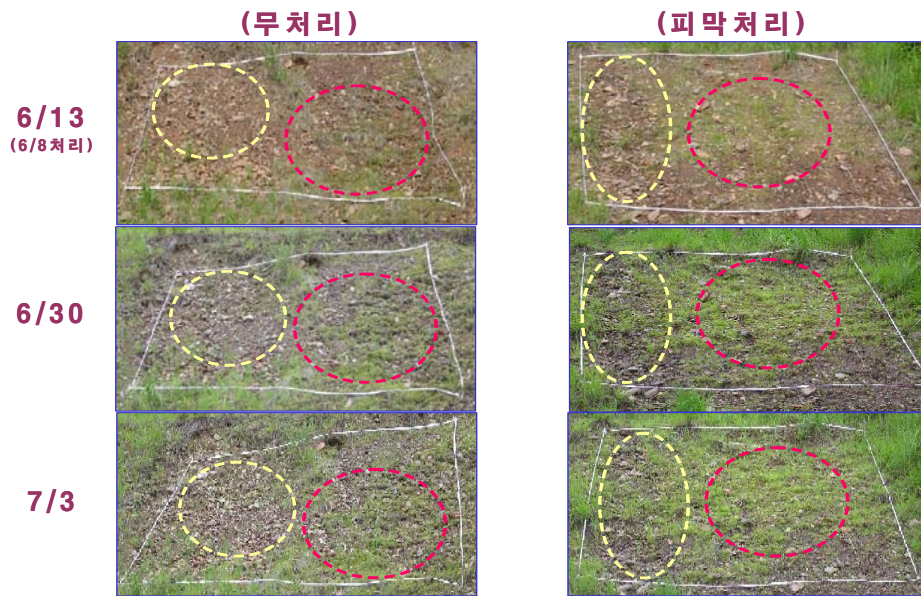


그림 86. 무처리와 피막처리 구획의 식생성장 상태.

제 14절. 코팅처리제 주입을 활용한 산성배수 발생 암석기원 토양의 식생피복

1. 이론적 배경

산성배수를 발생시키는 암석기원 토양은 산성이며 Al의 식물가용도가 높으며 Al독성에 의하여 식생의 성장이 원활하지 못하고 사면에 적용되는 식생피복이 실패하게 된다. 코팅처리제는 인산염(phosphate, PO_4^{3-})을 함유하고 있다. 인산염은 Al과 반응하여 용해도가 낮으며 안정한 알루미늄인산염 광물을 형성한다. 인산염을 함유한 코팅처리제의 주입은 토양에 함유된 활성 Al의 식물가용도를 저감한다. 토양의 Al 가용도와 독성 저감은 토양에서 식생의 성장을 원활히 할 것으로 판단된다. 인산염은 토양에 쉽게 흡착·고정 된다. 따라서 코팅처리제의 표면살포에 의한 토양 처리는 처리깊이에 제한이 있다. 이러한 처리깊이 문제를 해결하기 위하여 처리목표 깊이까지 코팅처리제를 주입하기 위하여 점적관수 장치를 고안하여 토양에 코팅처리제를 주입하고자 하였다.

2. 실험방법

황철석을 다량 함유한 옥천층군 변성퇴적암의 풍화에 의하여 발달된 토양을 대상

으로 코팅처리제 주입과 식생성장 시험을 실시하였다. 충북 보은군 군도8호선 절취 사면으로 토양과 풍화가 많이 진행된 암편이 혼재하는 곳이다. 시험대상사면은 절취 후 seed spray를 이용한 식생피복을 실시한 사면이나 Al의 독성으로 식생피복이 실패한 사면이다(그림 87). 사면 토양에 함유된 암편은 풍화가 많이 진행되어 육안으로 황철석의 존재를 확인할 수 없었다.



그림 87. 시험대상 사면 전경.

실험대상 사면에서 토양시료를 채취하여 실내에서 풍건한 후 rubber stopper를 이용하여 입단을 잘게 부수었다. 잘게 갈은 풍건시료를 체를 이용하여 입도가 2mm 이하인 시료를 회수하여 토양특성 분석 및 코팅처리제 주입에 의한 Al 식물가용도 변화시험에 이용하였다. 현장토양시료는 gravel을 약 3% 정도 함유하고 있었으며 2mm 이하의 입도를 가지는 토양의 입도분포는 phosphate 분산용액으로 충분히 분산시킨 후 laser입도분석기를 이용하여 분석하였다. 토양1 : 증류수10을 30분 동안 반응시키고 0.45μm membrane filter를 이용하여 그른 후 용액의 pH와 EC를 측정하였다. 코팅처리제(0.01M H_2O_2 -0.01M KH_2PO_4 -0.01M Na_2CO_3)의 주입에 의한 Al 식물가용도 변화를 알아보기 위하여 2mm 이하 입도를 가지는 풍건시료 100g과 코팅처리제 50ml를 비이커에 담고 상온에서 3일간 방치하였다. 방치 후 풍건하여 Al의 존재형태별로 추출·분석하여 코팅처리에 의한 Al의 식물가용도 변화를 측정하였다. 토양 Al의 존재형태별 추출방법은(Yaman and Akdeniz, 2006) 다음과 같으며 용액의 Al농도는 ICP-AES를 이용하여 측정하였다.

I. Water-soluble and exchangeable

1. 4g soil + 40ml 1M KCl shake for 30 minutes
2. centrifuge and decant into 200ml flask

3. wash with 40ml distilled water 3 times & add into 200ml flask
4. make the solution to be 200 ml

II. Carbonate and organically bound form

1. add 40ml 0.05M Na₂EDTA & shake for 5 minutes
2. centrifuge and decant into 200ml flask
3. wash with 40ml distilled water 3 times & add into 200ml flask
4. make the solution to be 200 ml

III. Fe and Mn oxide form

1. add 40ml 1M oxalic acid & shake for 5 minutes
2. centrifuge and decant into 200ml flask
3. wash with 40ml distilled water 3 times & add into 200ml flask
4. make the solution to be 200 ml

IV. Organic acid extractable form

1. add 40ml 1M citric acid & shake for 5 minutes
2. centrifuge and decant into 200ml flask
3. wash with 40ml distilled water 3 times & add into 200ml flask
4. make the solution to be 200 ml.

사면을 2m*4m로 구획하여 무처리와 코팅처리로 구분하여 시험시공을 실시하였다. 코팅처리제를 원하는 깊이까지 주입하기 위하여 점적관수장치를 고안하여 제작하였다(그림 88). 시험대상사면에 깊이와 폭이 약 10cm 정도의 이랑과 고랑을 만들고 이랑에 점적관수장치를 이용하여 코팅처리제를 주입하였다(그림 89). 사면에 코팅처리제를 주입하고 사면을 평탄화한 후 ryegrass 씨앗을 9g/1m²로 seed spray를 실시하였다. Seed spray 후 식생의 발아, 잎의 높이를 측정하여 성장상태를 기록하였다.

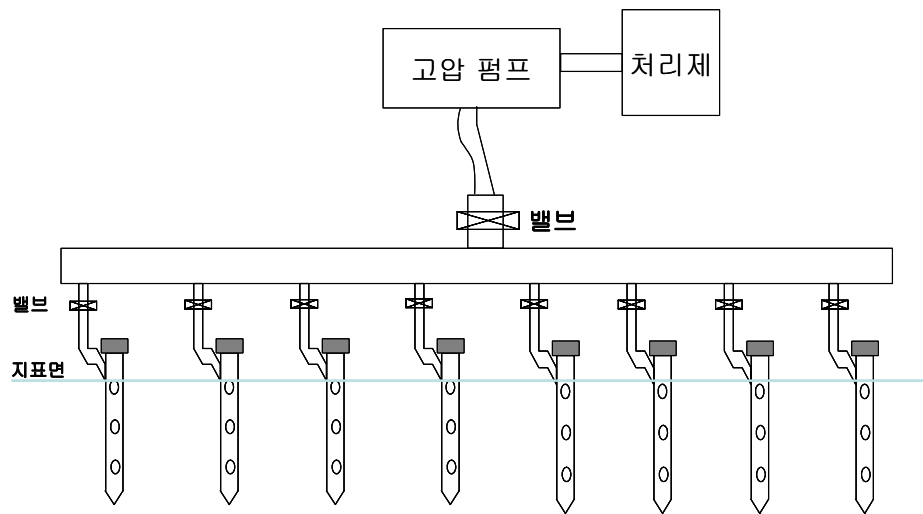


그림 88. 코팅처리제의 주입을 위한 점적관수장치 모식도.



그림 89. 점적관수장치를 이용한 코팅처리제 주입.

3. 연구결과

토양은 산성(pH 5.71)을 나타내었으며 용존이온의 농도를 간접적으로 지시하는 전기전도도(EC)는 $30.3\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 나타내었다. 코팅처리제 주입에 의하여 Al의 식물가용도가 많이 감소하였다. 특히 식물가용도가 가장 높은 water-soluble and exchangeable form의 농도가 $9.4\text{mg}/\text{kg}$ 에서 $0.0\text{mg}/\text{kg}$ 으로 감소하였다(표 18). 또한 코팅처리제 주입에 의하여 water-soluble and exchangeable form 뿐만 아니라 carbonate form, Fe and Mn-oxide form과 organic acid extractable form의 Al농도도 감소하였다. Al의 식물가용도 감소는 코팅처리제에 함유된 인산염이 토양의 Al과 반응하여 안정한 알루미늄인산염광물이 생성되었음을 의미한다.

구 분	무처리	코팅처리제 주입
water-soluble and exchangeable form	9.4mg/kg	0.0mg/kg
carbonate form	49.4mg/kg	34.8mg/kg
Fe- and Mn-oxide form	903.9mg/kg	728.8mg/kg
organic acid extractable form	58.0mg/kg	51.4mg/kg

표 18. 코팅처리제 주입에 따른 토양 Al 존재형태의 변화.

발아율은 코팅처리제 주입처리와 무처리가 비슷한 68%정도를 나타내었다. 식생의 성장상태를 관찰한 결과 코팅처리제를 주입한 토양에서 ryegrass의 성장이 월등히 좋았으며(그림 90, 92) 무처리 토양에서 ryegrass는 파종 후 약 1.5개월이 경과한 후 Al 독성이 징후인 잎의 끝부분이 마르고 고사하기 시작하였다(그림 91). 무처리 토양에서 ryegrass는 발아 후 약 2개월 경과 후에 대부분 고사하였다.

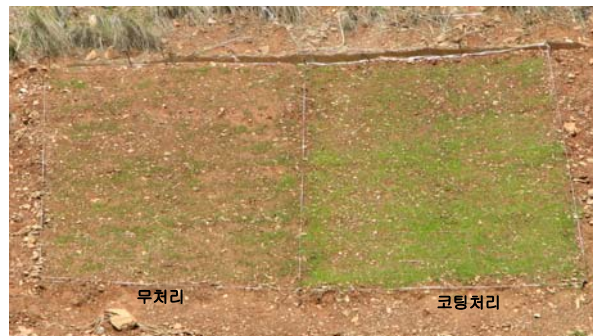


그림 90. 파종 1달 후 ryegrass의 성장상태.



그림 91. 파종 약 1.5달 정도 경과 후 식생성장 상태.

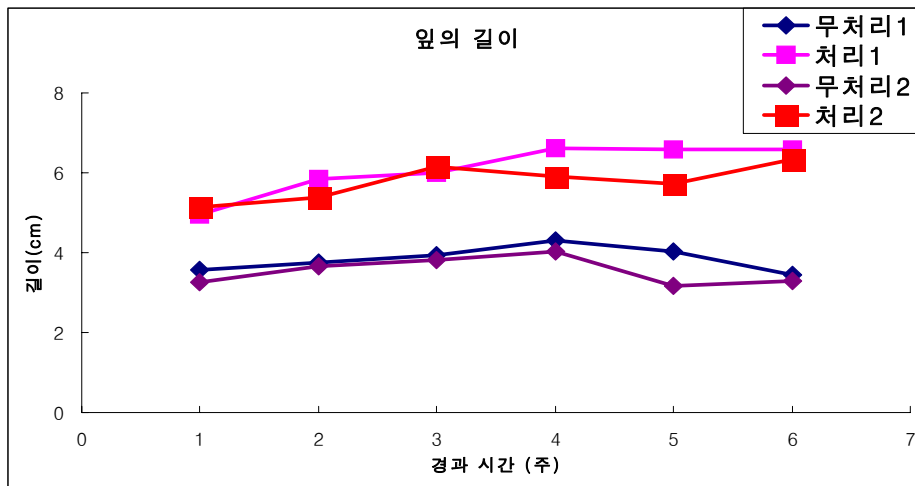


그림 92. 발아 후 ryegrass 앞의 길이.

제 15절. 산성암반배수가 발생하는 성토사면의 인산염 피막형성 처리를 통한 식생피복촉진

1. 이론적 배경

대부분 건설현장의 굴착토사 및 암석은 성토재, 골재 등으로 재활용되고 있다. 최근 절취 및 성토사면에 대한 녹화가 의무사항으로 되면서 대부분의 사면이 녹화되고 있다. 산성암반배수를 발생시키는 암석 혹은 토사를 성토재로 사용하여 사면에서 산성암반배수가 발생되어 식생피복이 이루어지지 않는 사면이 많이 발생한다. 사면의 식생피복의 불량은 사면의 침식을 촉진시켜 사면안정성을 저해하고 친환경 건설사업 수행의 장애요인으로 작용하고 있다. 사면으로부터 배출되는 산성암반배수에 의한 이러한 피해를 근원적으로 저감하기 위한 기술의 개발과 활용이 요구되고 있다. 실내에서 성공적으로 개발한 산성암반배수의 발생억제를 위한 인산염피막형성기술을 현장에 적용하여 보완함으로써 기술의 적용성을 높이고자 한다.

2. 실험 방법

OO국도 확장공사 현장의 산성암반배수가 발생시키는 변성퇴적암으로 성토된 사면을 대상으로 현장시험시공을 실시하였다(그림 93). 대상사면은 시공사에서 1차로 seed spray공법으로 식생피복을 시도하였으나 발아 후 식생의 고사로 식생피복이 실패된 사면이다. 사면은 산성암반배수가 발생하는 변성퇴적암의 암편과 토사가 혼재하는 곳으로 암편에서 발생하는 산성암반배수에 의하여 토사가 산성화되어 있어 식생이 자라지 못하고 있다. 사면의 암편으로부터 발생하는 산성배수가 토양의 산에 중화능력을 초과하고 산성배수가 발아된 식생에 영향을 주어 식생이 고사한 현상이다.



그림 93. 피막처리대상 사면.



그림 94. 처리를 위한 4개 구획.

산성암반배수가 발생하는 사면을 대상으로 4개의 section으로 나누어 무처리 1개 구획과 3개 구획을 피막형성제로 처리하였다(그림 94, 95). 각section은 처리제 140L를 1회 살포하였으며 피막형성제 살포 시에는 용액이 사면을 따라 흘러 유실되는 것을 방지하기 위하여 3-4회 반복하여 조금씩 살포하였다. 처리 후에 식생기반재(대생토)를 약 1cm 두께로 취부하고 식생의 발아 및 성장상태를 관찰하였다(그림 96).



그림 95. 피막형성제 살포.

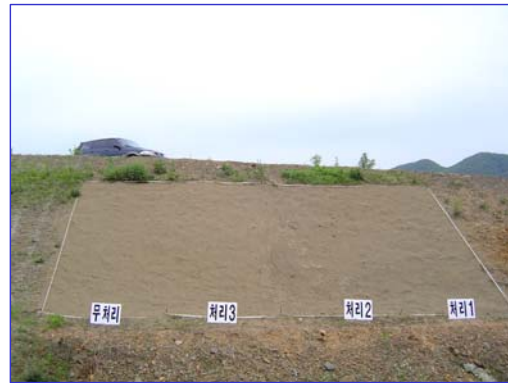


그림 96. 식생기반재 치부 후 전경.

3. 연구 결과

무처리와 처리 구획은 발아율과 약 1개월간의 식생성장에는 차이를 나타내지 않았다(그림 97). 시험시공 후 약 2개월이 경과한 후 무처리구획의 식생은 성토층에서 발생한 산성배수에 의하여 고사하였다. 반면 피막형성제로 처리한 구획은 식생성장 상태가 양호하였다(그림 98).



그림 97. 시험시공 1개월 경과 후 식생성장상태.



그림 98. 시험시공 2.5개월 경과 후 식생성장상태.

제 16절. 암반사면 및 성토층으로부터 산성배수 발생억제

1. 이론적 배경

산성암반배수가 발생될 개연성이 많은 건설현장에서 지반굴착은 지하에 안전하게 존재하던 황화광물이 지표에 노출되고 굴착과정에서 암석의 파쇄로 표면적의 급격히 증가한다. 대기노출과 표면적의 증가로 인하여 굴착된 암석에 함유된 황화광물은 급격히 산화되어 황산을 생성하고 이에 수반하여 산성암반배수가 발생된다. 건설현장에서 발생한 산성암반배수는 주변지역으로 유입되어 토양, 지표수, 지하수를 산성화 시키고 중금속으로 오염시킨다. 최근 건설현장에서 발생한 산성암반배수에 의한 민원발생으로 건설공사가 중단되고 설계변경이 발생하는 사례가 보고되고 있

다(그림 98). 특히 지반굴착에 의한 산성암반배수는 굴착 암석 및 토양의 야적과 성토 및 절취사면에서 발생된다. 야적장 및 성토장의 암석은 표면적이 커서 산성암반배수가 단기간에 많은 양이 발생된다. 일반적으로 야적장과 성토장은 주변지역보다 높은 경우가 많아 산성암반배수의 유출에 의한 피해가 크다. 절취사면에서 발생하는 산성암반배수는 사면암석의 풍화를 촉진, 사면구조물의 부식, 식생피복의 불량을 야기하여 경관을 훼손하고 사면안정성에 악영향을 미친다. 건설현장을 대상으로 시험시공을 시행하기 전에 실험실에서 성토층과 절취사면의 암석을 모사하여 피막형성처리를 하고 산성암반배수의 발생정도를 모니터링함으로써 원활한 현장시험시공을 수행할 수 있다.



그림 99. 성토층과 절취사면으로부터 발생하는 산성암반배수.

2. 실험 방법

경남 양산시 웅상읍에서 산출되는 함황철석 안산암과 충북 보은군 옥천층군의 변성퇴적암을 피막형성실험 대상 시료로 이용하였다.

성토층 모사실험

건설현장에서 채취한 암석시료를 crusher를 이용하여 5cm이하로 잘게 파쇄하였다. 파쇄된 암석 시료 5kg을 30cm*30cm*10cm 크기의 아크릴 박스에 채우고 무처리, 0.01M H_2O_2 -0.01M KH_2PO_4 -pH7용액을 이용하여 1회, 2회, 3회 처리, 0.01M H_2O_2 -0.01M KH_2PO_4 -pH7용액을 이용하여 1회 처리, 0.01M H_2O_2 -0.01M KH_2PO_4 -0.01M $Na-OAc$ -pH7용액을 이용하여 1회 처리를 하고 수돗물로 3회 세척 후에 건조하였다(그림 100). 처리용액은 2L를 이용하였다. 처리 및 건조 후에 0.001M H_2O_2 를 함유한 수돗물 2L를 첨가하여 overnight 동안 반응시킨 후에 용액을 회수하여 pH, EC, 양이온 함량, 음이온 함량, 산발생량을 측정하였다.

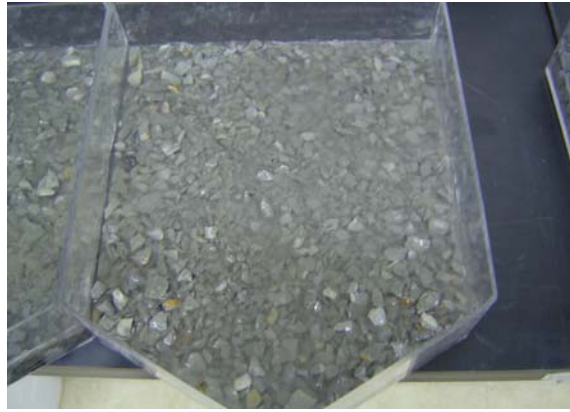


그림 100. 파쇄 암편의 전처리 및 산화.

절취사면 모사실험

건설현장에서 채취한 암석시료를 암석절단기를 이용하여 25cm*25cm*5cm시편을 제작하였다. 암석시편을 30cm*30cm*10cm 크기의 아크릴 박스에 채우고 무처리, 0.01M H_2O_2 -0.01M KH_2PO_4 -pH6용액을 이용하여 1회, 2회, 3회 처리하고 수돗물로 3회 세척 후에 건조하였다(그림 101). 처리용액은 5L를 이용하였다. 처리 및 건조 후에 0.01M H_2O_2 를 함유한 수돗물 5L를 첨가하여 overnight 동안 반응시킨 후에 암석표면에 노출된 황철석의 산화상태를 확인하였다.

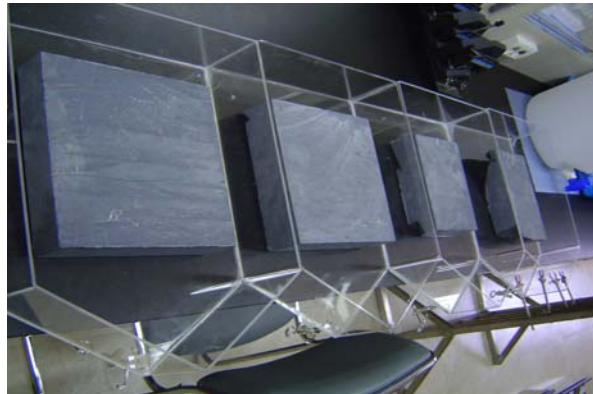


그림 101. 암석 시편의 전처리 및 산화.

3. 연구 결과

성토사면 모사실험

함황철석 안산암의 산발생량이 변성퇴적암에 비해 20배정도 높은 것으로 나타났다. 함황철석 안산암의 경우 무처리 대비 pH 6 인산염처리(0.01M H_2O_2 -0.01M KH_2PO_4 -pH6)에 의하여 88%이상 산발생량이 저감되었으며 용액의 pH는 3.04에서

3.33으로 감소하였다(표 19). 처리횟수가 증가함에 따라 산발생 저감율이 88%에서 97%로 증가하였다. 변성퇴적암의 경우 무처리 대비 pH 6 인산염처리(0.01M H₂O₂_0.01M KH₂PO₄_pH6)에 의하여 68%이상 산발생량이 저감되었으며 용액의 pH는 4.38에서 5.58로 증가하였다. 또한 처리 횟수가 증가함에 따라 산발생 저감율이 68%에서 98%로 증가하였다. 피막형성처리에 의하여 산발생량이 급격히 감소하였으나 황철석의 함량이 높은 안산암의 경우 3회 이상 처리하여야 산성암반배수에 의한 피해를 충분히 억제할 수 있다. 반면 변성퇴적암의 경우 1회 처리에 의하여 산성암반배수에 의한 피해를 충분히 저감할 수 있다. 0.01M H₂O₂_0.01M KH₂PO₄_pH7를 1회 처리하여 92%의 산발생량을 저감하였다. 안산암에 대한 0.01M H₂O₂_0.01M KH₂PO₄_0.01M Na-OAc_pH6처리는 산발생량을 95% 저감하였다.

암석	처 리	산발생량	pH	무처리 대비 저감율(%)
안 산 암	무처리	19.23gH ₂ SO ₄ /kg	3.04	0
	0.01M H ₂ O ₂ _0.01M KH ₂ PO ₄ _pH6(1회)	2.243gH ₂ SO ₄ /kg	3.08	88.3
	0.01M H ₂ O ₂ _0.01M KH ₂ PO ₄ _pH6(2회)	1.288gH ₂ SO ₄ /kg	3.16	93.3
	0.01M H ₂ O ₂ _0.01M KH ₂ PO ₄ _pH6(3회)	0.541gH ₂ SO ₄ /kg	3.33	97.2
	0.01M H ₂ O ₂ _0.01M KH ₂ PO ₄ _pH7(1회)	1.604H ₂ SO ₄ /kg	3.10	91.7
	0.01M H ₂ O ₂ _0.01M KH ₂ PO ₄ _0.01M Na-OAc_pH6(1회)	1.046H ₂ SO ₄ /kg	3.17	94.6
변 성 퇴 적 암	무처리	0.915gH ₂ SO ₄ /kg	4.38	0
	0.01M H ₂ O ₂ _0.01M KH ₂ PO ₄ _pH6(1회)	0.292gH ₂ SO ₄ /kg	4.77	68.1
	0.01M H ₂ O ₂ _0.01M KH ₂ PO ₄ _pH6(2회)	0.158gH ₂ SO ₄ /kg	5.10	82.7
	0.01M H ₂ O ₂ _0.01M KH ₂ PO ₄ _pH6(3회)	0.018gH ₂ SO ₄ /kg	5.58	98.0

표 19. 암석과 처리별 산발생량과 처리에 따른 산발생량 저감율.

절취사면 모사실험

암석시편을 이용하여 표면처리한 모든 시료의 반응 후 용액의 pH는 5.2 - 6.9정도로 나타났다. 시편의 표면적이 작아 반응이 느리게 진행되어 산성배수가 1일의 반응에 의하여 충분히 생성되지 않은 것으로 판단된다.

무처리한 안산암과 0.01M H₂O₂_0.01M KH₂PO₄_pH6로 1회 처리한 안산암의 표면에 노출된 황철석은 풍화가 많이 진행되었으며 반응용액에 흰색과 붉은색의 침전물을 확인하였다

(그림 102). 처리하지 않은 변성퇴적암, 0.01M H_2O_2 -0.01M KH_2PO_4 -pH6으로 1회와 2회 처리한 변성퇴적암의 표면에 노출된 황철석은 산화되어 산화부산물인 붉은색 산화철이 황철석 주변에 침전된 것을 관찰하였다(그림 103). 3회 처리한 변성퇴적암 표면의 황철석은 산화의 징후를 육안으로 관찰할 수 없었다. 산성암반배수를 발생시킬 개연성이 높은 암석의 절취사면과 성토사면의 처리는 최소한 3번을 시행하여야 효과가 나타나는 것으로 판단된다.

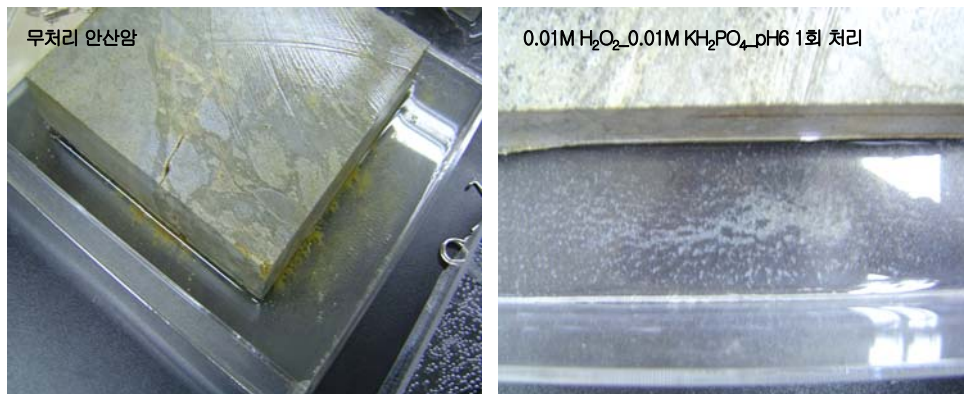


그림 102. 반응 후 암석시편과 붉은색 혹은 흰색 침전물.

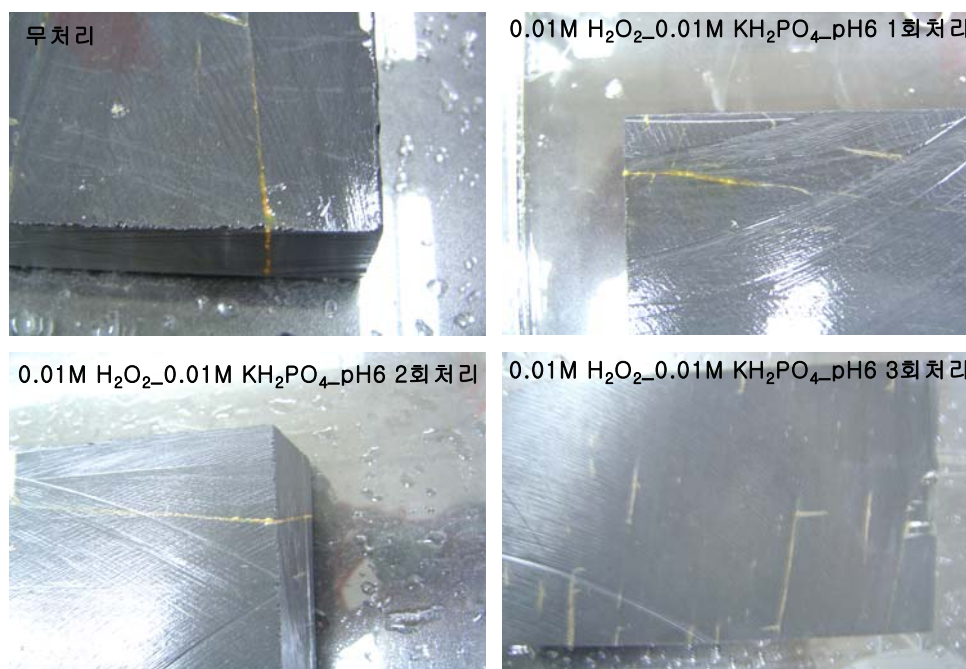


그림 103. 피막형성처리에 따른 황철석의 풍화정도.

제 17절. 산성암반배수가 발생하는 암반사면의 인산염 피막형성 처리(시험시공)

1. 이론적 배경

절취사면으로부터 발생하는 산성암반배수는 사면을 따라 흐르면서 사면암석의 풍화를 촉진시키고 사면구조물을 부식시켜 사면의 안정성을 저해한다. 또한 사면에 붉은색 산화철 혹은 흰색 알루미늄화합물을 생성시켜 경관을 훼손한다. 산성배수는 사면 및 주변지역의 토양, 지표수와 지하수를 산성화시키고 중금속으로 오염시켜 생태계에 악영향을 준다. 산성암반배수는 사면의 식생의 발아부진과 고사시킨다. 최근 사회기반시설의 확충으로 사면절취, 터널굴착 등 지반굴착이 빈번하게 이루어지고 있어 건설현장에서 산성암반배수에 의한 피해사례가 빈번히 보고되고 있다. 이러한 산성암반배수에 의한 피해를 저감하기 위하여 산성암반배수에 대한 철저한 평가뿐만 아니라 건설현장에서 산성암반배수에 대한 적절한 대책이 시행되어야 한다. 산성암반배수에 대한 대책의 일환으로 산성암반배수가 발생될 개연성이 있는 사면에 피막형성처리를 함으로서 산성암반배수의 발생을 근원적으로 억제하여 피해를 최소화할 수 있다. 1차년도와 1차년도 상반기 실내실험결과 인산염처리가 효율적으로 사면으로부터 산성암반배수의 발생을 억제할 수 있는 것으로 밝혀졌다. 실내에서 개발된 기술을 현장에 적용하여 기술의 현장 적용성을 시험·보완함으로써 기술의 현장적용 효율성을 제고할 필요가 있다.

2. 실험 방법

2.1. 보은군 군도8호선 절취사면

충청북도 보은군 산외면 거북치의 군도 8호선 암반절취사면을 대상으로 표면피막형성시험을 시행하였다. 대상사면은 암반으로 이루어져 있으며 현장조사에서 붉은색 침전물 사면하단에 식생피복이 불량 등 산성암반배수가 발생된 흔적을 발견하였다. 사면에서 황철석의 분포양태를 기재하고 시료를 채취하여 실내에서 산성암반배수의 발생개연성을 acid base account test method를 이용하여 측정하였다. 연구대상사면은 옥천층군 변성퇴적암으로서 층리를 따라 황철석이 산출되며 특히 석영맥을 따라 많은 양의 황철석이 집중되는 경향을 보였다. 사면절취 시에 생성된 절리가 많이 분포하고 있었다(그림 104).



그림 104. 석영액과 동반된 황철석.

2.2. 보은군 지방도571호선 절취사면

충북 보은군 내북면 쌍암리 지방도 751호선 절취사면을 대상으로 시험시공을 실시하였다(그림 105). 시험시공대상사면은 층리를 따라 절토한 곳으로 사면에 절리의 발달이 미약하다. 사면의 암석은 옥천층군 변성퇴적암으로 다량의 황철석을 함유하고 있다.



그림 105. 지방도571호선 시험시공대상사면.

2.3. 실험대상사면의 구획화 및 피막형성제 살포

연구대상사면의 폭은 20m, 높이 6m 정도이며 사면암석의 풍화층을 제거하고 신선한 암석이 표면에 노출되도록 사면을 정리하였다(그림 106). 사면에 4개의 section(3m*3m)을 만들었다. 사면 section은 사면에 깊이 약 10cm 정도의 홈을 파고 아크릴판을 심고 주변의 배수가 section안으로 유입되지 않도록 틈을 실리콘으로 채웠다(그림 107, 108, 109, 110).



그림 106. 사면 풍화층 제거.



그림 107. 사면정리 및 구획화.

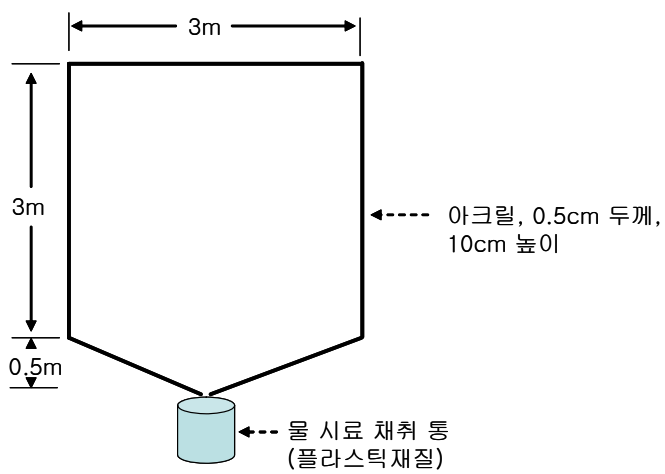


그림 108. Section 모식도.



그림 109. 군도8호선 시험시공사면 구획화.



그림 110. 지방도571호선 시험시공사면 구획화.

4개 section은 무처리(주변 하천수)와 $0.01M$ H_2O_2 - $0.01M$ KH_2PO_4 - $0.01M$ Na-carbonate_pH7 용액으로 각각 2개씩 처리하였다. 사면 $1m^2$ 당 처리제를 고압분무기($35kg/cm^2$)를 이용하여 최대한 골고루 피막형성제를 살포하였다(그림 111, 112). 피막형성제는 각 section에 1회에 $1m^2$ 당 1L씩 3회 살포하였다. Section 각 살포는 전회처리 후 표면이 건조된 후에 다음 살포를 실시하였다. 피막처리 후 사면 배수를 주기적으로 채취하여 현장 및 실내에서 분석하여 피막형성제 처리에 의한 사면의 산발생량을 모니터링 하였다.



그림 111. 고압분무기.



그림 112. 피막형성제 살포.

3. 연구 결과

피막처리에 의하여 암석의 풍화정도가 현격히 감소하였다(그림 113).



그림 113. 처리별 암석의 풍화정도(군도8호선 사면).

피막처리한 사면의 배수는 실험지역 우수의 평균 pH인 5.4와 유사한 값을 나타낸 반면 무처리 사면의 배수는 강산성으로 pH 3정도를 나타냈으며 무처리 사면의 배수는 처리사면에 비해 용존이온의 농도가 높은 것으로 나타났다(그림 114, 115).

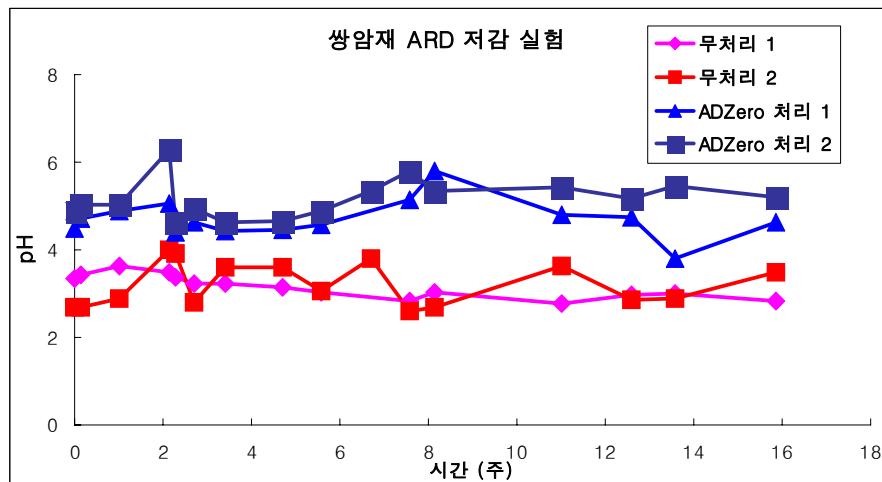


그림 114. 처리별 사면배수의 pH (지방도751호선 사면).

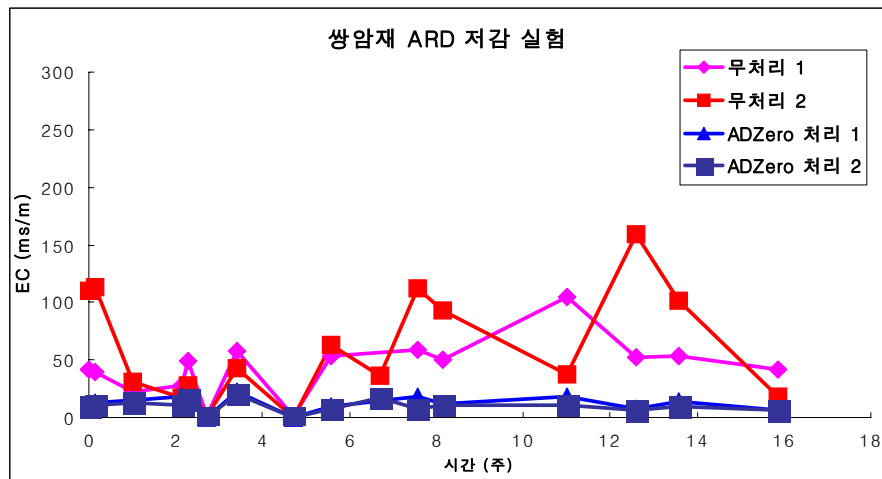


그림 115. 처리별 사면배수의 EC(지방도751호선 사면).

제 19절. 산성배수 발생사면의 산성배수 발생억제를 위한 피막처리 공사시방서

1. 일반사항

1.1. 적용범위

이 시방서는 절취사면에서의 산성암반배수 발생저감을 위하여 시공하는 피막형성 공사에 적용한다.

1.2. 시공전 검토사항

- (1) 절취사면 피막형성 시공계획서
- (2) 피막형성제 시험성적서 : 암석의 산성배수 발생능력, 암석의 중화능력, 피막처리에 따른 산성배수 발생억제 효율
- (3) 피막형성제 살포를 위해 사용하는 작업수의 성분 : pH, Ca 및 Fe 농도

2. 재료

2.1. 피막형성제

피막형성을 위한 화학약품은 H_2O_2 , KH_2PO_4 , $NaCO_3$ 이며 물에 쉽게 용해된다. 현장에서 0.01M H_2O_2 , 0.01M KH_2PO_4 , 0.01M $NaCO_3$ 의 농도가 되도록 물에 용해시켜 사용한다. H_2O_2 는 산화력과 부식성이 강함으로 취급 시에 고무장갑을 착용하고 피부접촉을 피하여야한다. 소요 화학약품을 물에 완전히 용해하여 제조한 피막형성제는 농도가 낮아 비교적 안전하다.

2.2. 물

깨끗한 시냇물이나 상수도 물을 사용하여야 하며, 칼슘과 철이 많이 섞여 있는 물을 사용해서는 안 된다.

3. 시공

3.1. 시공조건 확인

(1) 산성암반배수 발생억제 효율성과 시공 시의 안전을 고려하여 사면의 유기물, 암편, 흙 등이 최대한 제거된 상태인지 확인한다.

(2) 사면이 수분에 젖어 있는 상태에서 피막형성제를 살포할 경우 피막형성이 낮아져 산성배수 발생효율이 저감됨으로 강우를 피하여 사면이 건조한 상태에서 시공함이 적절하다. 사면에 지하수가 유출되어 사면이 젖어 있는 경우 피막형성을 위한 화학약품의 농도를 약 2배 정도 증가하여 사용한다.

3.2. 시공일반

(1) 계약대상자는 피막형성 공사를 하기 전에 피막형성제 혼합방법, 사용기계, 시공방법 등에 관한 시공계획서를 감독자(또는 감리자)에게 제출하고 협의해야 한다. 살포기계는 현장여건(사면의 높이, 면적 및 경사)을 고려하여 선택할 수 있으나 피막형성제 보관탱크로부터 살포대상사면까지 도달이 가능한 가압력이 있는 것을 선정하여 사용한다.

(2) 비탈면에 피막형성 공사를 하기 전에 압력공기로 먼지, 이토 및 부석 등 피막형성 과정에 지장을 주는 이물질들을 제거해야 한다.

(3) 피막형성제의 살포는 절취사면의 상부에서 하부로 진행해야 하며, 일정 시간 간격(1시간 이상)을 두고 살포하며 사면의 암석표면이 피막형성제에 의하여 젖도록 최소 3회 이상 살포한다. 증발이 활발한 여름의 경우 또는 사면경사가 1 : 0.5 이하의 급경사인 경우, 4회 이상 살포해야 한다. 살포량은 1회에 약 2L/m²를 기준으로 하되 사면에 발달된 절리, 암석의 조직 등을 고려하여 증감할 수 있다.

(4) 절취사면에 용수가 있을 경우에는 적절한 용수대책을 강구한 후 피막형성제를 살포하여야 하며, 강우 및 강설 등 일기가 좋지 못한 기상조건에서는 원칙적으로 시공을 금지해야 한다.

(5) 강우가 예상되는 기상 조건에서 부득이하게 작업이 진행된 경우, 피막형성제 살포 후 사면을 비닐 등으로 덮어서 강우로부터 보호해야 한다

4. 품질관리

(1) 피막형성제의 배합농도는 제조업자의 지침에 따르되, 절취사면의 산성배수

발생 개연성평가 결과를 고려하여 결정한다.

- (2) 피막형성제 살포 후 3회에 걸쳐 강우 후 절취사면의 산성암반배수 시료를 채취하여 pH 메타를 이용하여 암반배수의 산도를 측정한다. 우수의 pH를 고려하여 사면배수의 pH가 4 이상이 적정하다. 다만 시공지역의 우수의 pH가 4 이하 이면 시공지역의 우수 pH를 기준으로 한다.

제 20절. 유지관리지침

1. 일반사항

피막형성제가 제 기능을 충분히 발휘할 수 있도록 피막형성제가 살포된 사면 및 주변환경을 점검하고 유지관리 대책을 수립한다

2. 피막형성제가 살포된 사면의 점검

- (1) 사면 자체의 지반변형에 대한 조사
- (2) 사면표면의 암탈락 및 붕괴지점이 있는가를 수시로 조사.
- (3) 균열을 통한 지하수 누수 조사
- (4) 사면표면에 적갈색의 산화물 또는 유백색의 침전물이 형성되는지 확인

3. 피막형성제가 살포된 사면의 손상조치

- (1) 사면 자체의 변형으로 인한 피막형성제 살포 사면의 이상은 사면 붕괴의 우려가 높으므로 신속한 대책수립이 필요하다.
- (2) 사면표면에 암탈락 및 소규모 붕괴가 발생하는 경우, 해당 지점과 그 주위에 피막형성제를 처음 살포할 때와 같이 재살포한다.
- (3) 균열을 통한 지하수 누수가 관찰되는 경우, 수평배수공 설치 등 적절한 배수 대책을 수립한다.
- (4) 사면표면에 적갈색의 산화물 또는 유백색의 침전물이 형성되는 경우, 그 원인을 파악하고 해당 부분의 사면표면을 긁어낸 후 피막형성제를 재살포한다.

제 21절. 시공비용 산출, 경제성 검토 및 타 분야 적용성 검토

구분	규격	단위	단가	수량	금액(원)
재료비 (피막형성제)		kg			
인건비 (보통인부)	운반, 살포	인	57,820	0.03	1735
기계경비	장비일식	hr	47,899	0.025	1197
경유	저유황	ℓ	1,500		
기구손료				노무비의 3% 계상	
합계					20,000

표 20. 절취사면 산성배수저감 피막형성 공사 공사비 (m² 당)

[주] 1) 재료비는 물과 혼합한 액체상태의 피막형성제 수량이다.

2) 살포회수는 3회를 기준으로 한 것임.

3) 장비일식은 물탱크, 믹싱 및 펌핑장치, 압송호스, 스프레이건으로 구성된다.

4) 특수장비 및 비계비는 별도.

■ 개발 기술의 경제성 검토

1. 산성암반배수 발생저감을 위해 사용되는 타 공법과의 경제성 비교

1. 숏크리트공법과의 비교

피막형성제 살포를 통한 산성배수저감기술의 경제성을 평가하기 위하여 기존에 산성배수발생 저감을 위해 많이 적용하여 오던 숏크리트 시공비용과 비교하여 보았다. 숏크리트 시공비용은 아래 표 21와 같다. 즉 1m² 당 숏크리트 시공비는 두께 5cm로 취부할 때 약 17만원이고, 두께 10cm와 15cm로 취부할 경우는 약 18만6천원과 20만원이 각각 소요된다. 즉 5cm 두께로 시공하는 경우라도 피막형성제를 시공하는 경우보다 6배 이상의 비용이 소요된다.

구분		T=5	T=10	T=15
		금액	금액	금액
(1) 숏크리트 공사				
재료비	모래, 골재, 시멘트, 급결재	6,048	12,434	18,340
인건비	기계공, 특별인부, 보통인부 등	6,186	14,068	18,773
기계경비	Air Comp., Aliva, 취부기, 콘크리트 믹서, 발전기, 물탱크, 대차 등	2,302	4,840	7,119
소계		14,536	31,342	44,232
(2) Wire Mesh 설치공사				
재료비	와이어메쉬, 앵커핀, 드릴비트 등	6,361		
인건비	착암공, 보통인부 등	3,407		
기계경비	발전기, 핸드드릴	137		
소계		9,905	9,905	9,905
(3) Rock bolt 공사(연암)				
재료비	록볼트, 레진, plate, nut, 드릴빗트	31,111		
인건비	작업반장, 착암공, 보통인부 등	92,382		
기계경비	착암기, Air Comp., 대차	5,804		
소계		129,747	129,747	129,747
(4) 비계설치 및 해체				
재료비	강관, 아나방, 이음철물, 조임철물, 받침철물, 공구손료 등	2,152		
인건비	비계공, 보통인부	13,277		
소계		15,429	15,429	15,429
총 합계		169,617	186,423	199,313

표 21. 숏크리트시공 공사비 (㎡ 당).

[주] 1) '2007 종합적산정보' 자료 참고

2) 시공두께 적용기준은 다음과 같다.

시공두께	적 용 대 상 지 역
T=5cm	구배가 1:1 이하의 완만한 경질토 또는 자갈섞인 토사지역
T=10cm	구배가 1:0.7 내외의 완만한 풍화암, 연암지역 또는 보통암이 약간 혼재된 지역
T=15cm	구배가 1:0.5 내외의 보통암 및 경암지역

표 22. 경사에 따른 적용 두께.

피막형성제는 슛크리트 시공에 비해 직접 공사비가 상대적으로 매우 적게 드는점 외에도 공사기간이 훨씬 짧고 공정도 단순하며, 인체와 환경에 미치는 영향이 거의 없다는 장점이 있다. 따라서 본 공법은 환경오염부하를 최소화하는 청정건설 기술이라 할 수 있다.

또한 슛크리트를 시공한 경우에는 시간이 흐르면서 슛크리트면의 노후화로 인해 슛크리트 재료의 풍화, 열화, 백화현상 등이 발생하거나 균열이 발생하여 사면의 미관을 해치고 안정성에 영향을 미치는 경우가 많다. 따라서 유지관리 비용이 추가로 드는 경우가 자주 있다. 그러나 피막형성제는 두께가 매우 얇고 내구성이 강해 풍화, 열화, 균열과 같은 현상이 발생하지 않으며 유지관리 비용도 거의 들지 않는다. 피막형성제 살포공법과 슛크리트공법의 비교결과를 표23에 정리하였다.

구분	피막형성제 살포공법	슛크리트 공법
공사비	20,000원/m ²	169,000~200,000원/m ²
공사기간	살포시간만 필요	와이어메쉬 설치 시간이 추가로 필요
시공성	공정 단순, 시공장비 간단	와이어메쉬 설치, 록볼트공사 등 필요,
안전성	사용재료가 인체에 무해	건식공법의 경우 분진과다 발생으로 진폐증 등 유발가능
환경친화성	무 분진, 저소음, 환경오염의 우려가 없고 폐기물발생 없음	분진, 소음 발생, rebound(탈락 슛크리트) 발생
품질관리	사용재료가 기성제품이어서 품질관리 용이	건식공법의 경우 슛크리트 품질 관리 어려움, 시공두께 불균일
유지관리편리성	유지관리가 거의 필요없음	균열발생 빈도가 크므로 지속적인 유지관리 필요

표 23. 피막형성제 살포 공법과 슛크리트공법의 비교

2. 외국의 산성암반배수 발생저감공법과의 경제성 비교

미국의 기업체와 대학에서 개발한 4종류의 산성배수 발생저감공법과 본 연구에서 개발된 공법의 경제성을 비교해 보았다. 비교에 이용된 산성배수 발생저감공법들은 모두 피막형성을 통해 산성배수 발생을 억제하는 기술들이며, 각 기술에 대해 간단

히 설명하면 다음과 같다. 이 공법들은 산성광산배수 발생저감을 위해 노천채굴 광산의 대규모 절취사면들에도 활발하게 적용되고 있다.

(1) Furfuryl alcohol resin sealant (FARS)

본 공법은 아이다호주의 Idaho Falls에 있는 Intermountain Polymers사에 의해 개발된 기술이다. 이 기술은 퍼퍼릴 알콜(furfuryl alcohol)을 강한 산 촉매 (a strong acid catalyst)와 혼합시키면 저항성이 크고, 안정한 폴리머를 형성하는 원리를 이용한 것이다. 이때 형성된 폴리머는 광산폐석의 보호막 역할을 한다. FARS 물질의 점성도는 물과 유사하며 분무할 수 있다.

(2) EcoBond™ ARD (EcoBond)

본 공법은 콜로라도주의 덴버에 있는 Metals Treatment Technologies사에서 개발한 기술이다. 이 기술은 인산염(Phosphate)에 기반을 둔 기술로서 광산의 폐석, 광미, 사면 등에 있는 황철석의 산화를 방지하기 위하여 개발되었다. 이 기술을 적용하면 황철석의 표면을 안정한, 불용성의 물질로 코팅시킨다. EcoBond의 점성이 물과 비슷하다.

(3) 산화 마그네슘 피막형성(passivation) 기술 (UNR/MgO)

본 공법은 UNR(University of Nevada-Reno)에서 개발한 기술이다. 이 기술은 황화광물에 MgO 용액을 도포하여 황화광물 표면에 불활성의 피막을 형성시킴으로써 공기와 물의 접촉을 막아서 산의 형성을 방지하는 기술이다. MgO 용액의 점성도는 물과 비슷하다.

(4) 과망간산 칼륨 기술 (UNR/KP)

본 기술은 DuPont Technology사가 개발하고 특허를 받았으나, UNR (University of Nevada-Reno)에 기증하여 현재는 UNR이 특허를 소유하고 있다. 이 기술은 황화광물의 표면에 과망간산염 용액을 도포하여 불활성의 산화 철-망간 피막을 형성함으로써 공기와 물의 접촉을 막아서 산의 형성을 방지하는 기술이다. 과망간산염 용액의 점성도는 물과 비슷하다.

위에 제시한 각 공법의 시공단가는 표 24와 같다. 1달러(\$1.0)를 약 1,000원으로 환산할 때 미국에서 사용되는 공법의 1m²당 시공단가는 우리 돈으로 약 22,800원~82,100원에 달한다. 이 비용은 순수한 시공단가로서 재료 및 기계 운반비 등은 제외된 것이다. 만약에 이 기술들을 국내에 도입해서 사용하려면 순수 시공비용 외에 미국에서 국내까지의 재료 운반비와 관세 등이 추가 되어야 할 것이다. 따라서 재료 운반비와 관세 등을 제외한 순수 시공비용만 따져 보더라도 본 연구에서 개발한 공법이 미국에서 개발한 공법보다 경제성에서 훨씬 뛰어나다.

공법종류	재료비	% of total	시공비 및 기타 경비	% of total	단가/ft ²	단가/m ²
FARS	\$ 1.44	68%	\$0.68	32%	\$2.12	\$22.82
UNR/MgO	\$1.51	41%	\$2.14	59%	\$3.65	\$39.29
UNR/KP	\$1.51	41%	\$2.14	59%	\$3.65	\$39.29
EcoBond	\$4.1)	54%	\$3.52	46%	\$7.63	\$82.13

표 24. 외국의 유사공법 공사비 단가

(자료출처 : Final Report-Prevention of Acid Mine Drainage Generation from Open-Pit Highwalls, Mine waste Technology Program Activity III, Project 26, 2005)

3. 산성암반배수 처리에 드는 비용 절감효과

이미 발생한 산성암반배수에 의한 피해를 줄이기 위해서는 산성암반배수를 적절히 처리해야 한다. 산성암반배수 처리기술은 크게 자연정화법(Passive treatment)과 적극적 처리법(Active treatment)으로 구분된다.

자연정화법은 ‘지속적인 수처리약품, 인력, 동력을 사용하지 않는 ARD처리법’으로 자연발생적인 화학적, 생물학적 작용을 이용한다. 그 특징으로는 석회석 등 저가 중화물질을 활용하고, 반응속도가 낮으며, 낮은 오염부하 지역, 즉 유량이 작고 오염농도가 낮은 지역에 효과적이다. 철, 알루미늄 침전물이 유지관리에 중요변수이며, 유기물을 사용하여 산화환원을 조성하고 피복을 줄이기도 한다. 자연정화법은 정확한 운전수명 예측이 어려우며, 폐광산 지역에 적용사례가 많다. 자연정화시설의 종류로는 SAPS(Successive Alkalinity Producing System), 호기성 소택지(Aerobic wetland), 혐기성 소택지(Anaerobic wetland), 석회석 배수법(Limestone Drains) 등이 있다.

적극적 처리법은 산성배수처리를 위하여 지속적인 수처리제 투입과 상시 유지관리가 요구되는 방법이다. 대용량의 처리가 가능하고 처리효율이 확실하나 많은 운영비가 필요하다. 적극적 처리에 사용되는 방법으로는 pH조정(침전), 생물학적 처리, 전기화학적 처리, 이온교환법, 응집-여과, 결정화작용, Fixed-Plant 등이 있다.

국내의 폐탄광에서 발생한 산성배수 처리를 위해 설치된 자연정화시설의 사업비는 표 25와 같다.

지역	시도	탄광명	준공	처리용량(톤/일)	사업비(백만원)
강원	강릉	영동	98	606	450
		와룡산업(5갱)	03	688	508
	태백	성원	98	2,500	302
		동해(6갱)	98	269	2,781
		동해(소도천)	98	232	
		함태(고신갱)	98	228	
		태극(삼경갱)	98	160	
	정선	(동원)삼왕(875갱)	99	605	1,094
		(동원)삼왕(920, 970갱)	99	941	
	삼척	풍원	99	65	191
		(삼마)태정	04	400	843
호남	화순	호탄태백(2갱)	96	43	36
영남	문경	(석봉)성봉	97	464	528
		(봉명)단봉	99	509	294
	봉화	일월	04	126	310

표 25. 폐탄광 오염수질 정화시설 사업비 현황 (자료출처: 광해방지사업단).

현장여건과 처리용량에 따라 다소 차이가 있으나, 단순 산술 평균을 하면 개소 당 자연정화시설 건설에 평균 4억900만원이 소요된 것으로 나타난다. 그러나 도로건설이 광산보다는 훨씬 평지의 민가 가까운 곳에서 시행되는 점을 고려한다면 도로절취사면에서 발생하는 산성암반배수의 처리를 위한 자연정화시설의 사업비는 이보다 더 많이 들 것으로 보인다. 실제 충북 보은지역 일대를 통과하는 '00-00간 도로건설공사' 중 절취사면에서 발생한 산성암반배수를 처리하기 위해 현재까지 자연정화시설 설치와 운영에 약 30억원의 비용이 들었다고 한다(현장소장 personal communication).

이상에서 보는 바와 같이 피막형성제를 이용하여 절취사면으로부터의 산성암반배수 발생을 사전에 억제하거나 저감하게 되면 현장 개소당 최소 5억원 이상의 막대한 비용의 처리비용을 절감할 수 있다.

4. 산성암반배수로 인한 사회적, 경제적 손실 절감효과

절취사면에서 황철석의 산화에 의하여 발생하는 산성암반배수는 강산성이며 높은 농도의 중금속을 함유하고 있다. 이러한 강산성 암반배수에 의해 생기는 피해를 나

열하면 표 26와 같다.

피해 종류	피해 양상
수질오염	- 주위 하천을 중금속으로 오염시켜 궁극적으로는 사람의 건강에 악영향 미침 - 하천바닥에 Yellow boy 현상 또는 백화현상 유발
암석풍화 가속화	- 황철석의 산화로 암석의 풍화가 급속하게 진행하여 불안정 사면 유발
콘크리트 구조물 부식	- 사면의 옹벽, 측구, 숏크리트 등 부식 - 산성배수로 오염된 하천에 세워져 있는 교각의 부식
금속구조물 부식	- 사면에 설치된 앵커, 소일네일, 록볼트, 낙석방지망, 낙석방지책 등의 부식
토양오염 및 농경지피해	- 농작물의 고사
사면 식생피복 불량	- 식생공법 적용시 식물의 발아 및 성장에 심각한 장애를 일으켜서 식생 활착이 되지 않음
불량 성토재, 골재 형성	- 산성배수 유발 암석을 성토재 또는 골재로 사용할 경우 산성배수배출로 상기와 같은 각종 피해 유발
경관훼손	- 사면표면에 적갈색 및 유백색의 침전물 형성으로 경관훼손 및 도로사용자에게 불안감 유발

표 26. 절취사면 산성암반배수에 의한 피해

현재 정확한 통계는 없으나 산성암반배수 때문에 발생하는 피해를 전국적인 규모로 집계하여 돈으로 환산하면 수천억원대의 엄청난 비용이 될 것이다. 특히 우리나라는 산성배수 발생가능 암석이 전국에 걸쳐 고생대 평안층군, 옥천층군, 백악기 화산암류, 그리고 제3기 화산암/퇴적암층 등에 널리 분포하고 있고 또한 산성배수를 유발할 수 있는 황철석을 다량 포함하는 광화대가 전국에 산재하고 있다. 더욱이 우리나라는 산지가 전 국토의 70%를 차지하고 있는 지형적 특성으로 인하여 도로건설(도로신설, 도로확장, 도로선형 개량 등)과 부지(택지, 산업단지 등)조성에 의해 인위적인 비탈면이 지속적으로 확대 형성되어지고 있다. 이와 같은 상황에서 산성암반배수가 발생하는 건설현장은 지속적으로 증가할 것으로 보이며, 그에 따른 피해비용도 늘어날 것으로 전망된다. 따라서 피막형성제를 이용한 ARD발생저감 기술은 이러한 피해를 사전에 방지함으로써 막대한 경제적 손실을 막게 하는 효과를 가져온다.

5. 산성암반배수 발생저감기술 확보로 외국도입 기술료 절감

국내 최초로 절취사면의 산성암반배수 발생을 저감시킬 수 있는 피막형성제 기술

을 확보함으로써 기술의 자립화를 이루었으며 당해 기술을 외국에서 도입함으로써 매년 지불해야 하는 기술료를 절감할 수 있게 되었다. 기술료가 보통 당해 기술과 관련된 매출량의 몇 %를 준다는 식으로 정해진다는 사실을 고려하면 기술료 절감 효과는 외화사용을 상당량 줄일 수 있는 효과를 가져온다.

6. 산성암반배수 발생저감기술 해외시장 기술수출 효과

전 세계적으로 환경보호의 중요성에 대한 인식이 높아지고 있는 이때, 국가 기반 시설을 갖추기 위하여 도로망 건설 등 SOC(사회간접자본) 사업에 치중하고 있는 동남아와 아프리카 등 개발도상국을 대상으로 본 기술을 미국 등 선진국가보다 저렴한 값으로 수출할 계획을 세워 홍보를 하면 지금 당장은 아니더라도 산성배수에 의한 피해가 이슈화되기 시작할 때면 수출시장을 확보하고 외화를 벌 수 있을 것이라 기대된다.

7. 개발 기술의 타 분야 활용방안

(1) 폐광산에 적치된 광미 및 폐석 처리

국내에서 광미 및 폐석 등 광산폐기물로부터 산성배수 발생을 억제하기 위하여 가장 많이 사용하여온 방법은 저장 또는 차단형 매립(containment or encapsulation) 기술이다. 이 기술은 옹벽 혹은 흙제방 등 광산폐기물 저류시설을 축조하여 매립하는 방법으로, 필요한 경우 각종 차수재와 복토 및 식재 등을 실시한다. 종류로는 복토법(capping)과 수직벽법(vertical barrier) 및 수평벽법(horizontal barrier)이 있다.

이 방법은 오염처리 기술이 선정되기 전 또는 장기적으로 오염처리 시설의 설치가 유보된 지역에 사용되는 것이나, 우리나라에서는 오염지역의 근원적 처리법으로 인식되어 대부분의 금속광산 폐기물 정화시설에 설치 운영되고 있다.

피막형성제 기술은 폐광산에 적치된 광미 및 폐석으로부터 발생하는 산성배수를 저감할 수 있는 기술로도 훌륭하게 사용될 수 있다. 즉 광미 또는 폐석 적치장의 상부에서부터 스프링클러 등을 이용해 피막형성제를 충분히 살포하여 적치장의 겉 표면뿐 아니라 공극을 통해 다짐이 덜된 내부에 까지 피막형성제가 스며들게 하여 코팅을 함으로써 광미 및 폐석의 황철석이 물과 공기가 반응할 수 없도록 한다. 그 후 적치장 상부의 코팅된 광미나 폐석은 제거하여 폐갱내로 옮겨서 공동 충전재로 활용하고 적치장의 남은 부분에는 다시 피막형성제를 살포한다. 이런 식으로 반복 함으로써 야외에 적치된 광산폐기물을 환경오염 위험으로부터 안전하게 폐광 갱내

충전제로 활용할 수 있다.

참고로 2006년에 환경부에서 강원, 충남지역의 28개 광산에 대한 정밀조사를 수행한 결과, 광물찌꺼기는 만명광산 등 14개 광산에 총 665m³, 폐광석은 대원광산 등 21개 광산에 총 2만4,360m³가 적치돼 있는 것으로 나타났다.

(2) 건축석재 및 공예석재의 미관유지 및 내구성 강화

건축 및 공예석재(기념비의 조각품, 비문석, 묘석 등)는 암석의 물성, 매력, 수명 등에 따라 그 가치가 달라지며 개발기술 역시 암석물성에 크게 의존한다. 이들 석재는 균등한 외형이 나타나도록 가공하며, 암석의 외형은 주로 색채에 크게 의존하고 색채는 구성광물의 성분의 차이를 반영한다.

황철석, 자철석, 흑운모, 각섬석 등 철을 함유하고 있는 광물은 산성암석배수가 발생하는 것과 마찬가지로 산소와 물과 오랜 시간 동안 반응하면 산화하면서 산성배수를 발생시킨다. 따라서 이러한 광물을 많이 포함하고 있는 석재는 시간이 지남에 따라 물과 공기와 반응하는 시간이 길어지면서 철함유 광물들이 산화하여 녹슨 물이 흘러내린 것과 같은 양상을 보이면서 석재의 미관을 해치고 석재의 풍화를 촉진시킨다. 건축석재나 공예석재는 가급적이면 철광물을 많이 포함하는 암석을 사용하지 않는 것이 좋으나, 철광물을 많이 포함한 석재라도 외형이 아름다워서 석재로 이용하고자 할 때는 피막형성제를 암석표면에 살포하여 사용하면 된다. 그러므로 석재의 표면에 피막형성제를 살포하여 사용하면 어떤 종류의 암석이라도 산화의 걱정 없이 석재로 사용할 수 있다. 본 연구에서 개발된 피막형성제를 적절히 이용하면 석재 기준에 미흡하여 버려지는 상당량의 규격암석을 재활용할 수 있으리라 기대된다.

제 22절. 평가기법 및 대책공법의 현장적용 사례

1. 이론적 접근 및 목표

지하에 안정하게 존재하던 황화광물은 터널굴착, 사면절취 등에 의하여 지표에 노출되면 산소와 반응하여 산화되면서 황산을 생성하고 산성암반배수를 발생시킨다. 건설현장의 산성암반배수는 주변지역으로 유입되어 토양, 지표수, 지하수를 산성화시키고 중금속으로 오염 시킨다. 또한 사면에서 발생하는 산성암반배수는 사면암석의 풍화촉진 및 사면구조물의 부식을 야기하여 사면의 안정성을 저해한다. 최근 고속도로건설현장, 국도확장공사 현장, 택지조성공사현장 등에서 산성암반배수의 발생에 의하여 민원이 발생하여 공사중단, 설계변경, 하자보수 등의 문제로 원활한 사업추진이 어려운 현상이 빈번히 발생되고 있다. 따라서 건설사업의 조사·설계단계에서 산성암반배수에 대한 정확한 평가와 대책수립으로 환경친화적이며 원활한

사업 추진에 중요한 요소가 된다. 국가지원 지방도60호선의 장재, 봉림1, 봉림2 터널 계획구간의 암석에 대한 산성암반배수의 발생개연성을 평가하고 산성암반배수에 의한 피해를 방지하기 위한 대책공법의 추천이 본 연구의 목표이다.

2. 연구방법

지표지질 조사

1, 2, 봉림2 터널 계획구간의 지표면에서 암석의 종류, 구조를 현장에서 조사하였다.

시추코어 조사

장재, 봉림1, 봉림2 터널 계획구간에서 시추한 터널굴착구간 시추코어를 대상으로 암상, 황화광물의 산출여부를 육안 및 확대경을 이용하여 조사하였다(표 27).

구 분		시추공번호	구 분		시추공번호		
장재터널	시 점	TB1	봉림1터널	본 선	TB13-1		
		TB2			TB13-2		
		TB3		중 점	TB14		
	본 선	TB4			TB15		
		TB5			Tb16		
		TB6			Tb17		
	중 점	TB7		저토피		TB18	
봉림1터널	시 점	TB9	TB19				
		TB10	TB20				
		TB11	봉림2터널	중 점	Tb22		
		TB12			TB23		
		TB13			TB24		
					TB25		

표 27. 조사대상 시추코어.

암석의 산성암반배수 발생 개연성 시험(Acid Base Account Test)

터널 계획구간에서 채취한 시추코어 중 굴착예상 심도의 시료를 대상으로 황화광물의 존재여부를 육안으로 조사하고, 황화광물이 존재하는 암석과 황화광물이 존재하지 않는 대표 암석을 선정하여 분석하였다(표 28).

코어 번호	분석 점수	비 고	코어 번호	분석 점수	비 고
TB-1	3	-석영반암 -황철석이 분산형태로 산출	TB-13-2	1	-사암 -분산형태의 섬아연석과 황철석이 vein이 산출
TB-6	1	-안산암질 응회암	TB-15	1	-사암
TB-9	1	-화산쇄설성 사암 -분산형태의 미세한 황철석 vein이 산출	TB-20	2	-사암 -섬아연석과 황철석이 vein 형태로 산출
TB-12	1	-사암 -방해석 vein이 산출	TB-22	1	-화강암 -황철석이 분산형태로 산출

표 28. 분석 대상 시료 및 특성.

분석 대상 시료는 파쇄기(Crusher)를 이용하여 수cm 이하로 잘게 부수고 고르게 섞은 후 미분기(Pulverizer)로 200mesh 이하로 분말화하였다. 분말화한 시료를 대상으로 1) 최대산발생능력(Maximum Potential Acidity, MPA), 2) 산중화능력(Neutralization Potential, NP), 3) 순산발생량(Net Acid Generation, NAG)을 측정하였다.

1) 최대산발생능력(MPA) : 분말시료의 유황함량을 LECO사의 유황분석기를 이용하여 측정하고 $MAP(kgCaCO_3/t) = total\ S(\%) * 31.213$ 을 이용하여 MPA를 계산하였다.

2) 산중화능력(NP) : 표준 1N HCl을 이용하여 시료 내에 함유된 산 중화물질을 모두 소모시킨 후 0.1N 혹은 0.5N NaOH로 적정하여 NP를 측정하였다.

3) 순산발생량(NAG) : 분말시료에 15% H_2O_2 를 조금씩 가하여 암석의 황화광물을 산화시키고 산화반응이 완료된 후 일정 부피로 용액의량을 조절한다. 0.1N 혹은 0.5N NaOH를 이용하여 산화에 의하여 발생된 산(H^+)의량을 적정하여 측정한다.

4) 순산발생능력(NAPP)은 $NAPP = MPA - NP$ 를 이용하여 계산하였다.

모든 측정은 2반복 시료(Duplicate samples)를 이용하였으며, 순산발생량 측정 시에 3반복 시료(Triplicate samples)를 이용하여 2개의 시료는 NAG측정에 이용하고 1개의 시료는 NaOH 적정을 하지 않고 0.45 μ m membrane filter를 이용하여 고체와 액체를 분리하였다. 용액의 pH, EC, 주양이온(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})의 농도, 음이온(F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})의 농도, 중금속의 농도를 측정하였다.

3. 연구결과

지표지질

조사지역은 경남 김해시 한림면 장재리와 생림면 봉림리를 연결하는 지방도 개설 계획구간이다. 장재터널, 봉림1터널과 봉림2터널 굴착 설계구간은 분포하는 지질에 따라 시공공법과 환경 및 안전에 영향을 받을 수 있는 지역이다. 기존 지질도폭의 자료(이하영과 김상욱, 1964)에 의하면 화산암류인 팔용산 응회암과 주산 안산암이 분포하고 이를 관입한 반화강암이 이들 화산암류를 관입한 것으로 분류하였다. 야외조사 결과 이 지역에 분포하는 암석은 백악기 경상누층군의 유천층군에 해당하는 화산암과 퇴적암이 분포되어 있으며, 이들을 관입한 불국사 화강암이 관찰된다.

■ 장재터널구간

장재터널구간은 회류응회암(ash flow tuff)으로 이루어진 화산암이 분포하고 있다. 터널입구에 분포하는 암석은 라피리응회암에 해당하며 동질의 암편을 많이 함유하고 있다. 응회암을 관입한 석영반암이 터널입구의 북측에 분포하는데 그 범위가 야외노두에서 폭이 60m이상이 되는 암맥으로서 암상은 석영의 반정이 뚜렷하게 관찰되며, 풍화면에서는 풍화에 강한 석영이 돌출되어 있는 특징을 보인다. 일반적으로 이들 석영암맥은 화산활동으로 생기는 칼데라 외측에서 환상암맥으로 관입되는 경우가 흔히 관찰되는 경우이다. 지표상에서는 이들 회류 응회암은 동측의 산 정상으로 갈수록 라피리의 크기가 감소하면서 세립의 응회암으로 점이적인 변화를 보이며, STA 9+900지점에서는 라피리가 거의 보이지 않은 세립질 응회암이 분포하고 있으며, 열수변질작용에 의하여 납석화된 부분이 관찰되기도 한다. 그러나 STA 10+ 0 지점의 남측 지방도로 주위에서 관찰되는 화산암은 집괴암(agglomerate) 내지 화산각력암에 가까운 화산쇄설암류(Pyroclastic flow)가 분포하고 있는 것으로 보아 화산암 분출시에 분출양상이 상당히 격렬하였고 다양한 형태로 화산활동이 전개되었음을 짐작케 한다.

■ 봉림1터널 구간

이구간의 지표 지질의 구성암석은 주로 퇴적암인 사암으로 이루어져 있으며, 간혹 셰일과 이암이 협재한다. 사암과 이암은 응회질이며 층리의 발달이 미약한 반면 셰일에서는 층리의 발달이 양호한 편이다. 부분적으로 주변의 화강암의 관입으로 접촉변성작용을 받아 규화작용에 의해 혼펠스화된 부분도 관찰된다. 터널구간 동측부에서는 역질 사암이 분포되어 있는 것이 확인되며, 사암 내에 생긴 건열(sun crack)이 관찰된다.

■ 봉림2터널 구간

이 구간의 지표를 구성하고 있는 암석은 퇴적암이고 이를 관입한 세립질 미문상 화강암이 관찰된다. 퇴적암들은 이암과 사암 그리고 역암으로 이루어져 있으며, 화

강암의 관입에 의한 접촉변성작용으로 혼펠스화되어 있으며, 강도가 매우 강한 특징을 보인다. 일부 구간에서는 역질 사암(pebble bearing sandstone)이 관찰되며, 구성하고 역들은 규암 암편이 우세하다. 사암이나 이암은 층리가 잘 관찰되지 않으나, 이들 암석에 협재되는 세일층은 층리가 잘 발달되어있다. 석산 개발이 완료된 북측의 공장부지 절개 사면에서 관찰되는 세일층과 산등성이 서측 사면에서 측정된 층리의 경사가 동향하는 것으로 보아 이 퇴적층이 장채터널구간에 분포하고 있는 화산암보다 상위의 층으로서 칼데라 충전물일 가능성이 있으나, 더 많은 야외조사에 의해 해석이 되어야 할 것이다. 이에 반해 석산 개발이 끝난 공장부지 북단에 분포하고 있는 규암력을 포함하는 역암층이 분포하고 있는데 이들이 주변 이질 퇴적암과의 관계가 단층접촉을 하고 있는 것으로 예상되는 바, 이러한 결론은 광역적인 조사가 필요하다. 제2터널 동측에 분포하고 있는 화강암은 세립질 화강암으로서 유색광물로는 각섬석이 관찰된다. 터널구간에서는 서측 산정부의 퇴적암과의 경계부로 갈수록 미분상 구조와 미세 동공 구조(mirolitic texture)를 보이며, 세립화하는 경향이 보이는 것은 접촉 냉각대(chilled margin zone)의 영향인 것으로 생각된다. 화강암내에 발달하고 있는 절리들은 동서(EW)방향과 N40E-85SW방향의 절리들이 우세한 경향을 보인다. 퇴적암과 경계를 이루는 지점은 STA 13+ 420지점으로 접촉부의 퇴적암은 강한 열변성작용으로 심하게 혼펠스화되어 있는 것이 확인된다.

봉림 1터널과 2터널 경계부의 석산 개발 지역에는 N55E-75SE방향의 단층이 관찰되는 데 이 단층선을 따라 폭 60m이상의 산성암맥이 관입하였으며, 관입이후에도 주향이동단층 및 상하운동을 수반하는 단층 운동이 반복적으로 일어나 산성 암맥이 심하게 파쇄되어 있다.

또한 석산 절개사면에는 N14E-74NW방향의 주향이동과 정단층운동이 인지되는 단층선이 발달되어 있는 것이 확인된다.

시추코어

■ 장채터널구간

장채터널구간에서는 8개의 시추공에 대한 나온 코어 시료를 검토하였다. 지하에 분포하는 지질과 암상들은 지표에서 확인한 암상보다 더 많은 변화를 보여주며, 이는 층리가 잘 보이고 암상 특성의 연속성이 좋은 퇴적암보다 화산암이 공간적으로 변화가 심하다. 터널 시점 북측의 TB-1호공에서는 야외에서 관찰된 석영반암의 분포가 시추코어에서 확인 되었으며, 전반적으로 황철석이 산점상으로 전 구간에 걸쳐 배태되어 있고 섬아연석이 관찰된다. 그 외의 공(TB-2 ~3)에서는 석영안산암질 내지 안산암질 래피리 응회암의 분포가 확인된다. 장채터널 본선지역의 지하 암상 분포는 상부에서는 회류응회암의 유동구조를 보여주며, 래피리의 함량이 적은 세립질 응회암이 주이나, 하부에서는 구간별로 래피리의 각력이 많은 부분과 각력

의 비율이 낮은 세립질 응회암 등 변화가 심하다. 또한 일부 구간에서는 안산암 lava flow의 양상을 보이는 곳도 관찰되며, 심도가 깊은 곳에서는 레피리 각력이 증가하는 경향이 있다. TB-6 지점부터 종점 부근인 TB-7 까지는 Ignimbritic phenocrysts인 사장석 반정을 포함하는 pyroclastic flow가 분포되어 있는 것이 확인된다.

■ 봉림1터널구간

봉림 1터널 구간의 시점에서 확인된 암석들은 TB-8(변경전 TB-9)에서는 상부에는 퇴적암이고 하부에는 화산암이 확인되는 것으로 보아 경계부일 가능성이 높다. 특히 이 지역은 열극 충전형과 그 주변에 산점상으로 배태되어 있는 황화광화대가 확인된다. 그 외의 공(TB-9 ~ 13)에서는 사암과 역질 사암이 분포하고 있는 것이 확인되며, 간혹 저색 세일 층이 협재되기도 한다. 그러나 TB-14(TB-13-2)공의 코어 시료에서는 열극충진형 황화광물인 섬아연석, 황철석과 방연석을 수반하는 맥상 광화대가 발달하여 있고 그 주변으로는 열수 변질작용인 녹염석화작용이 확인되며, 변질대내에 황철석이 산점상으로 배태되어 있는 것이 확인된다.

■ 봉림2터널구간

봉림 2터널구간 전의 저토피지역의 시추공에서 확인된 코어 중 TB-21(TB-20)공에서는 사암내에 열극충진형 맥상 광화대가 확인되며, 수반광물로는 황철석, 섬아연석과 방연석이 관찰된다. 종점부근의 시추공에서는 지표지질 분포와 마찬가지로 화강암이 분포하고 있는 것이 확인되며, TB-22번 공 시료에서는 화강암내의 절리면을 따라 황철석이 농집 배태되어 있고 절리면 주변으로는 황철석이 산점상으로 배태되어 있는 것이 확인된다.

■ 황화광물을 함유한 시추코어 사진

TB-1 시추코어

황철석이 암석에 골고루 분산되어 산출된다. 일부의 황철석은 산화가 진행되어 산성암반배수가 생성되고 2차광물인 산화철이 침전된 것을 관찰하였다(그림 116, 117)



그림 116. TB-1시추코어:
분산형 황철석/산화흔적.

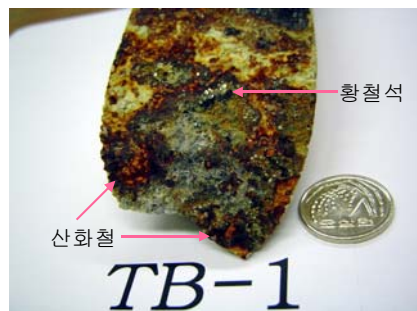


그림 117. TB-1시추코어:
황철석/산화철.

TB-9 시추코어

미세한 황철석으로 이루어진 세맥이 암석전체에 골고루 분산되어 산출된다(그림 118, 119).

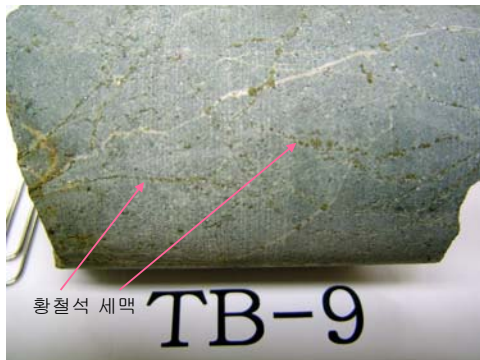


그림 118. TB-9시추코어: 분산형 황철석 세맥.



그림 119. TB-9시추코어: 황철석 세맥 단면.

TB-13-2 시추코어

미세한 방연석과 섬아연석으로 구성된 세맥과 분산형태로 산출되는 황철석을 관찰하였다(그림 120, 121).



그림 120. TB-13-2시추코어: 섬아연석/방연석 세맥.

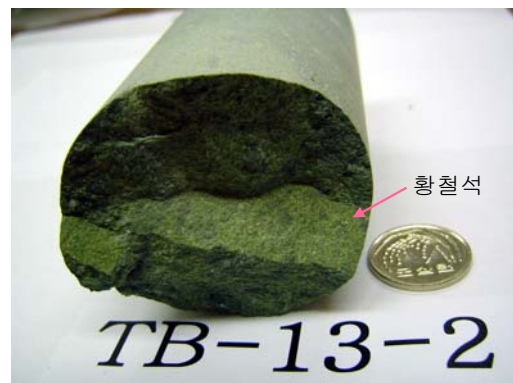


그림 121. TB-13-2시추코어: 황철석.

TB-20 시추코어

섬아연석, 방연석과 황철석이 맥상으로 산출되었으며 산에 대한 중화능력이 높은 방해석 맥이 같이 산출되었다(그림 122).

TB-22 시추코어

황철석이 암석 전체에 분산되어 산출된다(그림 123).

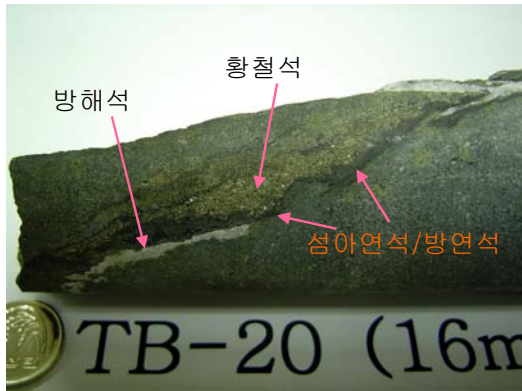


그림 122. TB-20시추코어: 황철석/섬아연석/방연석/방해석 맥.



그림 123. TB-22시추코어: 분산형 황철석.

■ 터널계획구간의 지질단면 및 황화광물 분포

장재터널

장재터널의 본선과 종점은 응회암으로 구성되어 있으며 시점은 관입암인 석영반암으로 구성되어있다. 응회암은 산성암반배수의 근원물질인 황화광물이 관찰되지 않았으나 시점에 분포하는 석영반암은 세립 - 중립의 황철석(FeS_2)이 분산상으로 산출된다(그림 124).

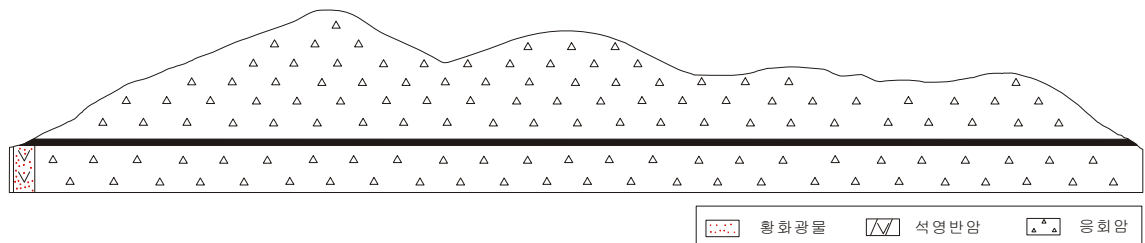


그림 124. 장재터널 계획구간 지질단면도.

봉림1터널과 봉림2터널

봉림1터널 계획구간은 세일이 협재된 사암으로 이루어져 있다. 봉림1터널의 시점에서 황철석 세맥과 함께 암석에 분산상으로 산출된다. 황철석 세맥은 폭 1 - 4m 정도로 분포할 것으로 예상된다. 봉림1터널 본선의 일부구간에서 황철석이 분산되어 산출되고 섬아연석(ZnS) 세맥이 분산되어 나타나는 것을 관찰하였다. 봉림2터널 계획구간은 세일과 역암이 협재된 사암과 화강암으로 구성되어 있다. 화강암은 세립의 분산형태의 황철석이 관찰되었다. 봉림1터널과 봉림2터널의 중간부분(저토피)는 사암으로 구성되어 있으며 Felsite dyke가 관입되어 있다. 일부구간에서 약 5 - 10cm 두께의 황철석과 섬아연석 맥이 관찰되었다. 시추조사에서 확인되지 않은 사암구간에서 황화광물(황철석, 방연석, 섬아연석)의 맥이 존재할 개연성이 매우 높다(그림 125).

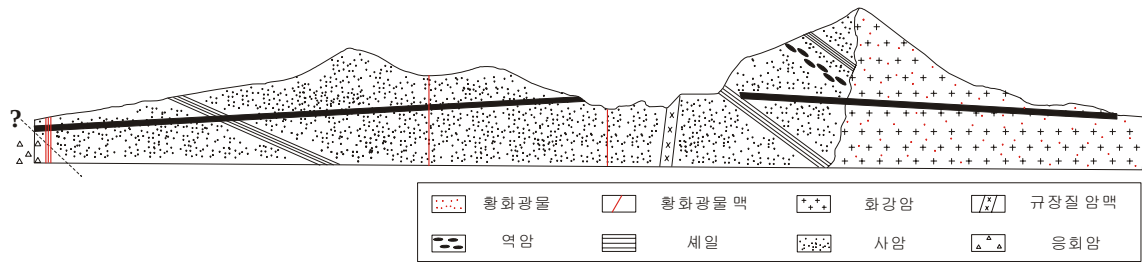


그림 125. 봉림1, 봉림2 터널 계획구간 지질단면도.

암석의 산성암반배수 발생 개연성(ABA test)

산성암반배수의 발생 개연성

암석의 최대산발생능력(MPA), 산중화능력(NP), 순산발생능력(NAPP), 순산발생량(NAG)을 표 29에 나타내었다.

시 료 번 호	비 고	Total S (%)	MPA (KgCaCO ₃ /t)	NP (KgCaCO ₃ /t)	NAPP (KgCaCO ₃ /t)	NAG (KgH ₂ SO ₄ /t)	NP/MPA	NAG* (pH)
TB-1*	16m, 장채시점	0.023	0.712	-0.037	0.749	0.521	-0.053	3.56
TB-1**	9m, 장채시점	0.079	2.477	-0.200	2.677	3.060	-0.081	2.77
TB-1***	22m, 장채시점	0.173	5.400	-0.162	5.562	2.450	-0.030	2.56
TB-6	93m, 장채본선	0.001	0.027	19.338	-19.311	0.000	728.863	6.78
TB-9	봉림1시점	3.710	115.800	1.988	113.813	46.062	0.017	1.97
TB-12	봉림1시점	0.013	0.406	36.725	-36.319	0.000	90.542	6.91
TB-13-2	39m, 봉림1본선	0.208	6.492	18.225	-11.733	0.000	2.807	7.24
TB-15	22m, 봉림1종점	0.001	0.025	1.975	-1.950	0.000	79.591	5.02
TB-20*	16m, 저토피/황철석, 방연석, 섬아연석 맥	6.630	206.942	33.400	173.542	98.147	0.161	1.65
TB-20**	16m, 저토피	0.000	0.052	2.338	-2.338	0.000	45.387	5.22
TB-22	봉림2종점	0.027	0.844	14.850	-14.006	0.000	17.598	6.49

표 29. 산성암반배수 발생 개연성 시험 (ABA test) 결과.

순산발생량(NAG)와 순산발생능력(NAPP)을 이용하여 암석을 산성암반배수 발생시키는 것과 산성배수를 발생 시키지 않는 것으로 분류하였다(그림 126). TB-1, TB-9, TB-13-2 vein, TB-20 암석은 산성암반배수를 발생시킬 개연성이 있는 암석으로 분류되었다. 반면 다른 암석들은 산성암반배수를 발생시킬 개연성이 낮은

암석으로 분류되었다. 육안관찰결과 화강암(TB-22)과 TB-13-2는 산성암반배수를 발생시킬 개연성이 있는 것으로 판단되었으나 ABA test 결과 산성암반배수를 발생시킬 개연성이 낮은 것으로 나타났다.

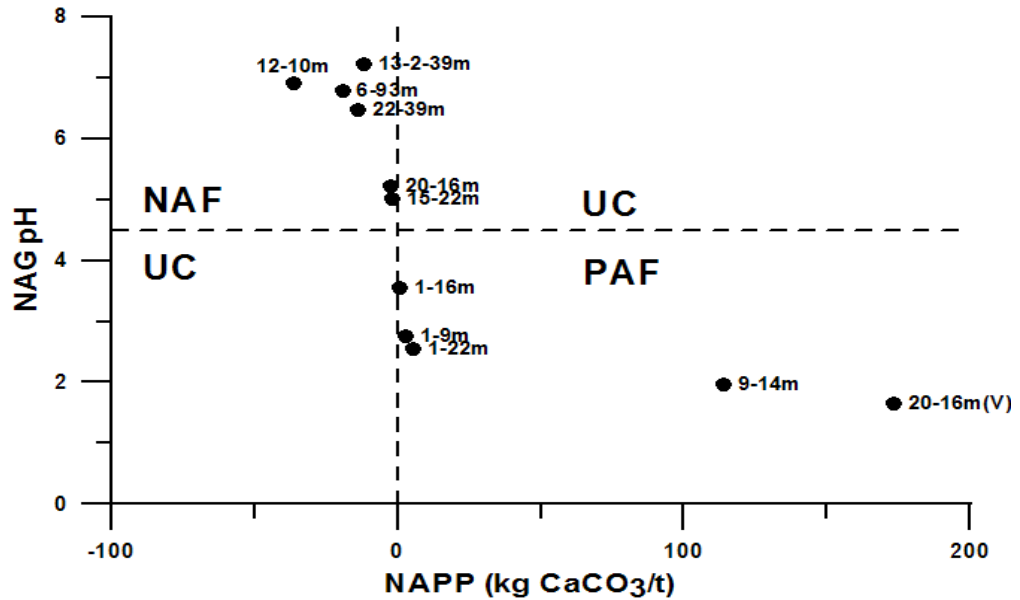


그림 126. NAG와 NAPP를 이용한 산성암반배수 발생개연성 평가; NAF: 비산성암반배수발생, PAF: 산성암반배수 발생.

산중화능력(NP)/최대산발생능력(MPA)를 이용하여 산성암반배수의 위해도에 따라 암석을 분류하였다. TB-1, TB-9, TB-20-vein은 산성암반배수에 의하여 피해를 나타낼 개연성이 있는 암석으로 TB-13-2는 주의가 요구되는 암석으로 분류되었다 (표 30).

위해도등급	NP/MPA	시료 번호	비 고
위 험	<1	TB-1, TB-9, TB-20 vein	-산성암반배수에 대한 대책필요함
주 의	1-2 or 3	TB-13-2	-공사기간에 황화광물의 함량, 산출상태를 관찰하고 필요에 따라 대책수립이 요구됨
안 전	>2	TB-6, TB-12, TB-20, TB-22	-산성암반배수에 의한 피해가 없을 것으로 판단됨 -육안관찰결과 화강암(TB-22)은 일정량의 황철석이 함유되어 있어 공사기간 중에 세심한 관찰이 요구됨

표 30. 위해도에 따른 암석의 분류.

산성암반배수에 의한 오염물질 부하

암석 분말시료와 15% H_2O_2 용액(1:100)을 반응 시킨 후 용액의 주 양이온과 중금속의 농도를 표 31에 도시하였다.

시 료	Mg	Ca	Na	K	Al	Mn	Fe	As	Cd	Ni	Zn	Pb	Cr	Co	Cu
	----mg/L(ppm)----				-----μg/L(ppb)-----										
TB-1*	0.17	2.24	0.96	2.84	568	1230	190	8	25	12	3070	1250	5	7	218
TB-1**	0.15	1.11	1.21	2.49	1520	40.0	492	1	65	11	1490	208	6	8	42
TB-1***	0.21	1.93	1.23	2.58	1700	38.0	477	1	6	12	56	56	7	7	15
TB-6	0.64	54.5	0.96	1.93	83	128.0	6	7	5	11	4	2	7	6	10
TB-9	6.16	10.1	2.35	4.01	9190	1220	33000	92	14	38	14	114	11	212	84
TB-12	0.84	52.0	1.13	0.21	102	129.0	8	7	5	11	5	4	5	11	13
TB-13-2	0.59	39.0	1.06	0.20	101	86.0	6	6	5	10	5	4	5	5	17
TB-15	1.11	2.64	1.13	0.17	73	88.0	67	28	2	5	2	2	10	6	6
TB-20	1.20	5.06	1.30	0.21	58	248.0	47	7	5	12	5	5	7	6	8
TB-20V	27.40	135.8	1.50	0.61	24304	3640	136350	256	43	173	43	43	10	429	83
TB-22	0.41	52.8	0.90	0.63	44	34.0	35	51	2	5	2	2	8	5	4
STD*					300	2000	200	100	20		1000	200	500		500

표 31. 암석의 오염물질 부하예측.

황화광물의 산화시험결과 TB-1, TB-9과 TB-20V 암석으로부터 발생하는 산성암반배수는 중금속, 철, 망간, 알루미늄이 높을 것으로 판단된다. 따라서 터널공사에 의하여 발생하는 산성암반배수의 중화뿐만 아니라 중금속 제거에 필요한 공법이 적용되어야 할 것으로 판단된다.

시 료	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
	----- mg/L -----			
TB-1 [*]	0.178	0.589	0.552	9.896
TB-1 ^{**}	0.183	0.600	0.406	1.211
TB-1 ^{***}	0.183	0.388	0.000	0.730
TB-6	0.197	0.374	0.411	0.518
TB-9	0.214	1.045	0.348	11.823
TB-12	0.274	0.464	0.412	0.554
TB-13-2	0.212	0.459	0.000	1.021
TB-15	0.198	0.554	0.000	0.000
TB-20	1.245	0.686	0.000	1.455
TB-20V	0.679	0.620	0.000	14.505
TB-22	0.230	1.194	0.000	2.554

표 32. 시료1 : 과산화수소반응용액100을 반응시킨 후 용액의 양이온 농도.

시료와 과산화수소용액의 반응 후 음이온(F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)의 농도는 암석의 산화와 용해과정의 반응을 유추할 수 있다(표 31). 특히 SO₄²⁻는 대부분 황화광물의 산화에 의하여 생성된 산물로 판단된다. 육안관찰에서 황화광물의 존재가 확인된 TB-1, TB-9, TB-20, TB-20V, TB-22 시료에서 상대적으로 높은 SO₄²⁻의 농도를 나타내었다. 높은 SO₄²⁻ 농도를 가지는 TB-1, TB-9, TB-20V 시료는 산성암반 배수를 발생 시킬 개연성이 높음을 의미한다.

4. 산성배수에 대한 대책공법 검토

산성배수의 발생억제

산성암반배수는 황화광물과 산소의 접촉에 의한 산화과정에 의하여 발생된다. 산화과정에서 미생물은 황화광물을 직접 산화시키거나 산화를 촉진시킨다. 따라서 암석

으로부터 산성배수의 발생을 근원적으로 방지하거나 저감하는 것은 산소와 황화광물의 접촉차단, 황화광물의 산화에 관여하는 미생물의 조절을 통하여 가능하다.

■ 표면피막형성기술(Micro-encapsulation)

산성암반배수의 발생을 근원적으로 억제하기 위한 기술로서 최근에 개발된 신기술이다. 황철석 표면에 Nano-scale의 얇은 피막을 형성시켜 산소와 황철석의 접촉을 차단하여 황철석의 산화를 방지 혹은 억제하는 기술이다. 황철석 표면의 피막형성을 위한 처리제로 인산염, 규산염, KMnO_4 용액이 개발되었다. 피막형성기술은 현장에서 그 효능이 입증되었으며 비교적 저비용의 대책공법으로 알려져 있다. 피막형성을 위한 처리과정에서 일부의 황철석이 산화되어 처리 후 용액은 산성이며 중금속을 함유하는 경향이 있다. 따라서 피막형성에 의하여 산과 중금속에 대한 처리방안이 강구되어야 한다. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 용액을 이용하여 피막형성과정에서 생성된 산과 중금속을 성공적으로 처리된 사례가 보고되고 있다.

■ 격리(Containment or Encapsulation)

산성암반배수를 발생시키는 물질(암석)을 대기와 용존산소를 함유한 물과의 접촉을 물리적으로 차단하는 방법이다(그림 127). 점질의 토양 혹은 Bentonite를 이용하여 표면 및 측면으로부터 우수의 침투를 배재하여 산소와 황화광물의 접촉을 차단한다.

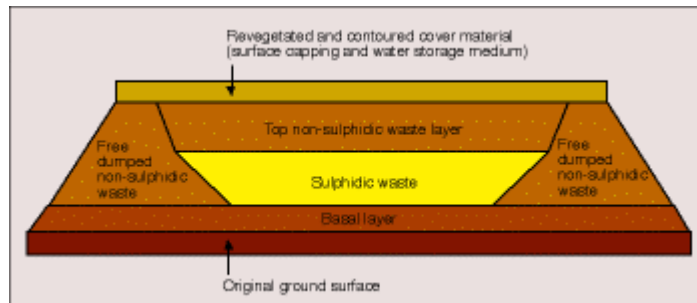


그림 127. Containment 모식도.

■ 수막 저장(Underwater Storage)

인공습지를 조성하여 호수 바닥에 산성암반배수를 발생시키는 물질을 충전하고 산성배수 발생물질의 상부에 일정 두께의 불투수성 토양으로 덮은 후에 호수에 담수하는 것으로서 토양과 물에 의하여 산소의 접촉을 차단하는 공법이다.

■ 살균제를 이용한 황화광물의 산화억제

황화광물의 산화반응은 미생물의 작용과 순수 무기적인 반응의 복합과정이다. 미생물은 황화광물을 직접 산화시키거나 산화반응을 촉진시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 황화광물의 산화에 관여하는 미생물의 활동을 억제함으로써 산성암반배수

의 발생을 저감할 수 있다. 미생물의 활동억제를 위하여 Sodium lauryl sulfate, sodium benzoate와 같은 살균제를 현장에서 사용하고 있으나 살균제에 의한 환경 오염문제로 사용이 제한되고 있는 실정이다.

산성배수의 처리

■ 화학적 중화 처리(Chemical treatment)

화학적 중화제인 NaOH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 등을 이용하여 산성암반배수를 중화시키고 동시에 중금속을 침전시켜 정화시키는 공법이다. 화학적 중화처리공법은 반응조와 침전조가 주구성요소이다. 지속적인 화학제의 투입, 침전물의 제거를 실시하여함으로 관리가 어렵고 고비용의 처리공법으로 알려져 있다.

■ 인공습지를 이용한 처리(Wetland)

환원성 인공습지를 이용한 처리공법은 산성이며 중금속을 많이 함유한 산성암반배수를 습지에서 생물학적 환원작용, 안정화를 이용하여 산성암반배수를 처리하는 공법이다(그림 128). 일반적으로 인공습지공법은 넓은 부지가 요구되는 단점이 있으나 비교적 관리가 쉽고 비용이 적게 소요되어 많이 이용되는 공법이다.

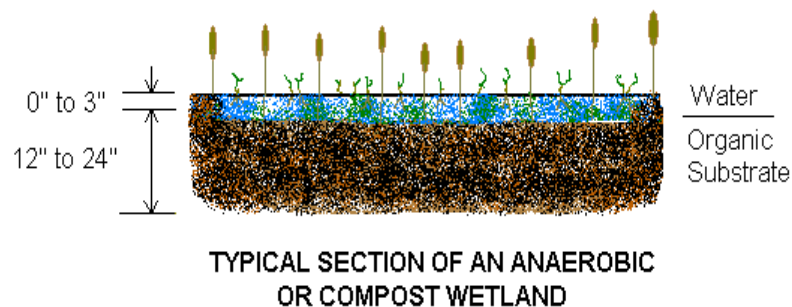


그림 128. 산성배수 처리를 위한 인공습지 단면.

■ 석회암 수로를 이용한 중화처리(Limestone channel)

석회암의 주구성광물인 방해석(CaCO_3)은 산에 대한 중화능력이 높은 자연물질로 알려져 있다. 산성암반배수가 석회암 수로를 통과할 때 방해석과 배수에 포함된 H^+ 이 반응하여 중화된다(그림 129, 130). 배수의 pH 상승과 함께 산성암반배수에 함유되어 있는 중금속도 침전되어 제거된다. 석회암 수로의 설치 초기에는 중화효율

이 높으나 시간이 경과함에 따라 중화과정에서 침전된 산화철의 석회암 표면코팅으로 석회석의 중화효율이 저감되는 현상이 나타난다. 이러한 중화효율의 저감을 개선하기 위하여 일정시간이 경과한 후 수로의 석회암을 교체하여야하는 단점이 있다.

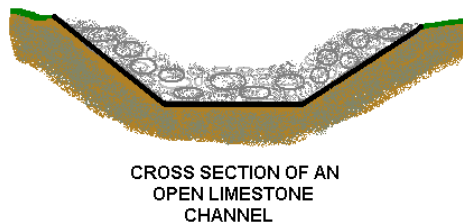


그림 129. 석회암 수로의 단면.

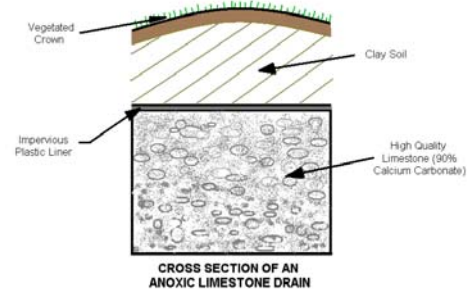


그림 130. 석회암 암거수로 단면.

■ 산성배수 발생물질에 중화제의 첨가를 통한 처리(Blending)

석회암, 제강슬래그, lime kiln dust 등 산에 대한 중화능력이 높은 물질을 산성암반배수를 발생시키는 물질과 혼합함으로써 생성된 산성배수가 중화시키는 공법이다. Blending에 의한 중화공법은 산성광산배수의 발생저감을 위한 광미의 처리에 많이 사용되어온 공법이다.

5. 결론

산성배수의 발생개연성

■ 장재터널

시점의 지반은 황철석을 많이 함유한 석영반암으로 구성되어 있으며 본선과 종점은 황화광물을 함유하지 않은 응회암으로 이루어져 있다. 본선과 종점 구간은 산성암반배수가 발생할 개연성이 없다. 반면 시점의 석영반암은 산성암반배수를 발생시킬 개연성이 높고 대책이 필요한 것으로 밝혀졌다. 절취와 터널굴착 과정에서 생성된 사면과 굴착된 암석으로부터 산성암반배수가 발생되어 환경오염과 사면 안정성을 저해할 개연성이 높다.

■ 봉림1터널

봉림1터널 계획구간의 지반은 세일이 협재된 사암으로 구성되어 있다. 시추코어에서 일부구간에서 맥상의 황화광물(황철석, 섬아연석)이 관찰되었으며 산성암반배수 발생 개연성의 시험결과에 의하면 대책수립 혹은 주의가 필요한 것으로 밝혀졌다.

또한 봉림1터널 계획구간에 시추조사가 이루어지지 않은 일부구간에서 맥상의 황화광물이 존재할 개연성이 높다. 따라서 공사기간 중에 현장에서 황화광물의 산출여부와 산출량에 대한 주의 깊은 관찰과 대책수립이 요구된다.

■ 봉림2터널

봉림2터널 계획구간의 지반은 셰일과 역암을 협재한 사암과 화강암으로 구성되어 있다. 발생 개연성 시험결과 화강암과 사암은 산성암반배수가 발생할 개연성이 없는 것으로 밝혀졌다. 사암은 봉림1터널 계획구간의 사암과 동일한 암상으로서 봉림2터널 계획구간에서도 맥상의 황화광물이 존재할 개연성이 있다. 따라서 사암 구간에서의 지반굴착과정에서 황화광물의 산출여부를 주의 깊게 관찰해야 될 것으로 판단된다.

산성배수에 대한 대책

■ 절취사면 및 터널사면의 산성배수 발생저감 대책

장재터널 시점, 봉림1터널 시점, 봉림1터널 본선에서 사면절취, 터널굴착은 황화광물을 함유한 지반이 노출될 개연성이 높다. 따라서 터널 외부뿐만 아니라 내구의 사면에서 산성암반배수가 발생되어 환경오염과 사면의 안정성을 저해할 것으로 판단된다. 따라서 사면에서 산성암반배수의 발생을 근본적으로 저감시킬 대책수립 및 시행이 필요하다.

터널 내부사면

터널본선 계획구간에서 국부적으로 황화광물이 농집되어 나타난다. 따라서 본선의 내부사면 전체에서 산성암반배수가 발생되지 않고 좁은 범위에서 집중적으로 발생된다. 터널건설이 완료된 후에 산성암반배수가 발생하는 구간에서는 구조물의 노후화가 빨리 진행되어 안정을 저해할 것으로 판단된다. 따라서 산성암반배수가 발생할 개연성이 높은 구간에서 발생저감대책 수립이 필요하다. 산성암반배수의 발생저감 대책은 다음과 같다.

가) 굴착 후 황화광물의 산화가 진행되기 전에 표면피막형성제를 살포한다.

- 피막형성제 살포시기 : 굴착완료 직후
- 피막형성제 : 인산염피막형성제(한국지질자원연구원)
- 피막형성제의 살포방법 및 횟수 : 일반 분무기를 이용하여 암석표면이 젖을 정도로 살포하고 암석표면이 건조될 때까지 기다린 후에 다시 살포한다. 이러한 과정을 3회 이상 반복하여 살포한다.

나) 피막형처리를 한 후에 내산성 시멘트몰타를 이용하여 슛크리트를 시공한다.

다) 사면안정성 확보를 위하여 설치하는 앵커, 락볼트 등은 산에 의하여

부식이 잘되지 않는 재질을 이용한다. 구조물 설치에 사용되는 시멘트는 내산성을 사용한다.

터널 외부사면

가) 굴착 후 황화광물의 산화가 진행되기 전에 표면피막형성제를 살포한다.

- 피막형성제 살포시기 : 굴착완료 직후
- 피막형성제 : 인산염피막형성제(한국지질자원연구원)
- 피막형성제의 살포방법 및 횟수 : 일반 분무기를 이용하여 암석표면이 젖을 정도로 살포하고 암석표면이 건조될 때까지 기다린 후에 다시 살포한다. 이러한 과정을 3회 이상 반복하여 살포한다.

나) 사면안정성 확보를 위하여 설치하는 앵커, 락볼트 등은 산에 의하여 부식이 잘되지 않는 재질을 이용한다. 구조물 설치에 사용되는 시멘트는 내산성을 사용한다.

다) 사면의 식생피복

(1) 흡사면 : 중화처리를 위해 생석회를 살포한 후에 분말석회암을 함유한 점토를 이용하여 식생공을 적용한다.

****점토를 사용하지 않은 직접 파종공법은 피해야함****

(2) 암반사면 : 피막형성처리 후에 분말석회암을 함유한 점토를 이용하여 식생공을 적용한다.

■ 굴착 암석의 처리 및 재활용

석영반암

장재터널 시점에 좁은 범위에 분포하는 암석으로서 산성암반배수를 발생시킬 개연성이 높아 대책수립 및 시행이 요구되는 암석으로 판명되었다. 석영반암은 터널의 시점에 분포하고 있어 본선구간에 비하여 많은 량의 암석이 굴착이 이루어질 것으로 판단된다. 따라서 굴착된 암석은 노반충진, 골재로서의 재활용에 많은 제약이 있다. 골재로서의 재활용은 불가능할 것으로 판단되며 노반충진물질로서 활용은 주의가 필요하다. 노반충진물질로 재활용은 앞에 앞에서 대책공법검토에서 기술한 격리공법(Containment)을 준용하는 것이 바람직하다고 판단된다(그림 131).

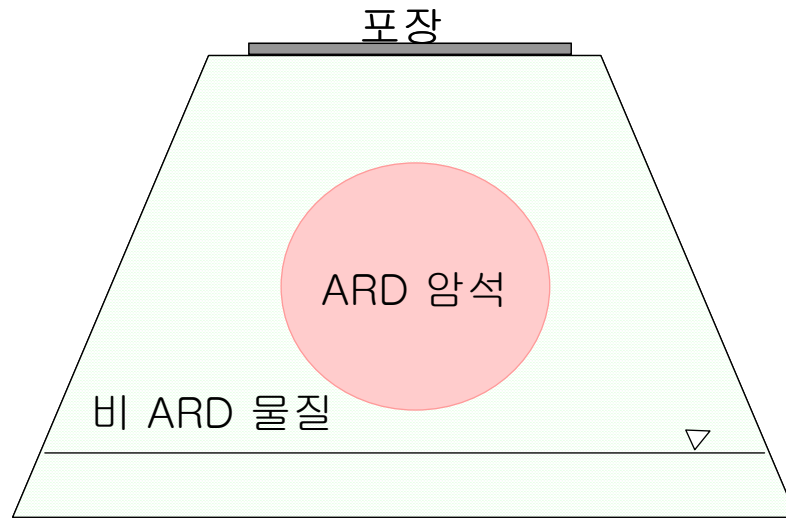


그림 131. 산성암반배수 발생물질의 노반충진제로서 활용
모식도.

응회암

장재터널 본선구간에 분포하는 암석으로서 산성암반배수가 발생될 개연성이 없는 암석으로 판명되었다. 따라서 암석의 물성이 활용대상의 조건에 적합하면 활용에 제약이 없을 것으로 판단되나 주변에 납석광산과 산점상 내지 맥상의 황철석이 산출되는 것이 확인되고 있으며 시추조사에서 누락된 위험구간이 있을 개연성이 높다. 시공과정에서 황화광물의 산출이 확인되면 골재로서 사용배제, 사면처리, 굴착 암석의 처리는 산성암반배수가 발생하는 암석의 처리에 준용한다.

사암

봉림1터널과 봉림2터널 계획구간의 일부에 분포하는 암석으로서 맥상의 황화광물이 존재한다. 따라서 황화광물을 함유하지 않은 암석은 활용에 제약이 없다. 반면 황화광물함유암석과 황화광물이 없는 암석의 비율이 1 : 10 이상으로 하여 노반충진제로 활용이 가능하다고 판단된다. 골재로서 활용 시에는 황화광물이 함유된 암석은 배제하는 것이 적합하다.

화강암

봉림2터널 계획구간의 종점과 본선구간에 분포하는 암석으로서 ABA test결과 산성암반배수가 발생될 개연성이 높지 않은 것으로 밝혀졌다. 육안관찰결과 상당량의 황철석이 함유되어 있다. 육안관찰과 ABA test결과와의 상이함은 ABA test를 실시한 암석의 산에 대한 중화능력이 산발생량보다 높아 나타난 결과로 판단된다. 화강

암은 암석의 조직이 치밀하여 다른 암석에 비하여 암석내부로 물의 침투가 어렵다. 따라서 황철석의 함량이 동일한 다른 암종에 비하여 산성암반배수의 발생량이 상대적으로 낮다. 노반충진제로의 활용에는 제약이 없을 것으로 판단된다. 반면 콘크리트 골재로의 활용은 부적합하며 아스콘포장용 골재로의 활용에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

■ 터널 및 사면의 산성배수 처리

공사 기간

장재터널 시점의 사면절취와 봉림1터널 굴착공사기간 중에 터널과 사면으로부터 산성암반배수가 발생될 개연성이 높다. 따라서 산성암반배수의 처리를 위한 중화반응조와 응집조의 설치가 필요하다. 산성암반배수의 중화처리는 화학적 중화제(예: NaOH)를 사용함이 적합할 것으로 판단된다.

굴착된 암석으로부터 발생하는 산성암반배수에 의한 환경오염을 방지하기 위하여 적치장에서 차수대책이 필요하며 암석으로부터 발생하는 산성암반배수는 터널수와 사면배수 처리시설과 연결하여 처리하면 된다.

준공 후 산성배수의 처리

최근 사면으로부터 산성암반배수에 의한 환경오염뿐만 아니라 차량통행에 의하여 발생하는 중금속과 유기오염물질의 처리에 많은 관심을 기울이고 있다. 또한 2005년에 건교부에서 차량운행에 의하여 도로에서 발생하는 오염물질의 처리에 대한 연구과제가 신규로 시작되어 기술개발이 이루어지고 있다. 일부 처리기술은 개발이 완료되어 현장에 성공적으로 적용되고 있다. 준공 후에 발생될 개연성이 있는 산성암반배수의 처리를 위한 시설은 차량운행에서 발생하는 오염물질 처리시설과 병합해서 운용함이 적합하다고 판단된다. 현장에서 효율성이 검증된 도로배수의 오염물질 처리시설은 산성암반배수의 처리에 적합하도록 변형된 기법이 적합하다. 변형된 처리기법은 기존의 인공습지를 이용한 처리시설에 석회암수로의 병합형태이다. 석회암수로에서 산성암반배수가 중화되고 인공습지에서 중금속과 유기오염물질이 처리되는 system이다. 인공습지의 크기는 배수의 량과 residence time에 따라 결정된다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

가. 연구개발 수행 진도율

(1차년도)

구 분 개발내용	연 구 개 발 기 간												진도(%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
문헌조사 및 암반산성배수 발생 가능지역 도출													100
암석유형별 산성배수 발생특성 조사													100
암반산성배수 발생 절취사면의 현황조사													100
황철석 산화에 의한 암석 풍화 및 물성에 미치는 영향파악													100
암반산성배수에 의한 콘크리트 구조물 부식													100
표준 황철석의 산화특성 파악													100
최적 피막형성조건 도출													100
백화현상과 산성배수 발생사면의 흰색침전물 분석													100
총 진도율													100

..... 당초계획
 _____ 실적

(2차년도)

[illegible]

(3차년도)

[illegible]

나. 연구개발 목표의 달성도

(1차년도)

목 표	달성도 (%)	내 용
황철석의 산화반응에 따른 산성배수 생성특성 파악	100	- 반응초기 10시간은 산화속도가 빠르며 10시간 이후에는 반응속도가 급격히 저하됨: 초기에 용액 pH가 3으로 급격히 낮아지다가 안정화됨 - 황철석의 산화과정에 철이 먼저 용출되고 나중에 SO_4^{2-}가 용출됨을 확인하였으며 이를 바탕으로 최적피막형성조건 도출시험의 기초 자료로 활용하였음 - 음이온영향: Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}는 영향이 없음 PO_4^{3-}는 산화반응을 저감시킴
암석유형별 산성배수 발생특성 파악	100	- 문헌연구를 통해 산성배수가 발생될 개연성이 있는 암석의 분포지역을 추출하고 현장조사를 통하여 확인하였음(옥천층군, 평안층군, 백악기 화산암류, 제3기 화산암 및 퇴적암) - 암석유형별 산성배수 생성특성을 정량적으로 파악하였으며 암석유형과 산성배수발생특성의 상관관계를 바탕으로 우리나라 암석의 특성에 적합한 평가방법을 확립하였음 (Acid base accounting method)
산성배수가 절취사면의 구조물 및 사면안정성에 미치는 영향파악	100	- 현장조사를 통하여 결과 산성배수는 암석의 풍화를 가속화하여 사면안정성을 크게 저하됨을 확인하였으며 실내시험을 통하여 정량화하였음 - 산성배수는 사면의 콘크리트구조물을 부식시켜 표면부식과 배면공동을 형성시킴 - 산성배수에 의한 콘크리트의 부식은 cementing material의 용출로 무게 및 물성(강도)을 저하시킴
황철석 표면의 철인산염 피막형성의 최적조건 도출	100	- 표준 황철석의 산화특성을 바탕으로 최적피막형성조건 도출시험을 한 결과 pH6, PO_4^{3-} 0.01M, H_2O_2 0.01M 조건의 피막형성제가 가장 경제적이며 효율적으로 산성배수의 발생을 저감시킬 수 있으며 저온(4℃)과 고온(70℃)조건에서도 동일한 효율을 발휘하였음 - pH 3 - 10 조건하에서 피막의 효율성과 내구성의 변화가 없었음 - 반사현미경과 SEM을 이용하여 표면을 관찰한 결과 표면에 피막이 형성되어 효과적으로 산성배수의 발생을 저감함 - 0.1% $\text{Ca}(\text{OH})_2$용액을 이용하여 피막형성 이후 반응용액의 중금속, PO_4^{3-}를 효과적으로 제거하였음 - XPS를 이용한 표면분석결과 표면에 30Å 두께의 피막을 확인하였음
백화현상과 사면의 흰색 침전물의 비교 분석	100	- 백화현상은 CaCO_3이고 반면 산성배수 발생사면의 흰색 침전물은 수산화알루미늄과 황산알루미늄으로 밝혀짐

(2차년도)

목 표	달성도 (%)	내 용
암석유형별 최적피막형성 조건 도출	100	- 안산암, 변성퇴적암, 폐석탄, 제3기 퇴적암을 대상으로 최적 피막형성제를 도출하였음. - 최적 피막형성제는 암석의 유형에 관계없이 0.01M H₂O₂_0.01M KH₂PO₄_pH6으로 밝혀졌음.
Silicate를 이용한 황철석의 산화억제	100	- 2차년도 연구과정에서 새로운 피막형성기술에 대한 정보를 습득하여 시험하였음. - Silicate는 Fe³⁺와 complex를 형성하고 pH 5 이상에서 황철석 표면에 산화철과 Fe-silicate 광물이 침전됨. - Fe-silicate의 형성, 황철석 표면의 산화철과 Fe-silicate의 침전으로 Fe³⁺의 활성도를 저하시키고 표면코팅에 의하여 황철석의 산화가 억제됨. - 최적조건 : 0.01M H₂O₂_0.01M Na-silicate_Na-OAc buffer.
피막형성제가 숏크리트의 강도에 미치는 영향	100	- 피막형성제의 농도가 0 - 100%인 물을 사용하여 콘크리트를 성형하고 양생하여 강도의 변화를 시험하였음. - 피막형성제가 25%이상에서 콘크리트의 강도가 약간 저하되었음. - 현장에서 피막형성제의 살포방법에 비추어 피막형성제에 의한 콘크리트의 강도저하는 없을 것으로 판단됨.
피막형성처리가 식생공적용에 미치는 영향 파악	100	- 산성암반배수가 발생하는 성토사면을 모사하여 피막형성처리와 무처리를 대비하여 온실에서 실험. - 무처리 대비 피막형성처리가 식생성장을 5배 이상 촉진.
피막형성처리의 현장적용	100	- 산성암반배수가 발생하는 암반사면과 성토사면을 대상으로 현장 시험시공이 완료되어 효능을 모니터링 중이며 처리된 사면에서 암석의 풍화정도가 현격히 떨어짐. - 암반사면은 산성배수의 발생정도, 성토사면은 식생의 활착정도를 모니터링 중임.
산성암반배수의 발생개연성 평가기법의 현장적용	100	- 1차 년도에 확립한 암석의 산성암반배수 발생개연성 평가기법을 터널설계에 적용하여 암석을 평가하고 대책공법을 추천하였음.

(3차년도)

목 표	달성도 (%)	내 용
피막형성처리의 현장적용 및 개선	100	- 산성배수 발생 암사면에 적용하여 사면배수의 pH가 우수 pH 5.4와 유사한 수질을 확보하였음. - 산성배수 발생사면 암석의 풍화가 현격히 저감되었음. - 피막형성제가 0.01M Na_2CO_3를 첨가하였을 경우 피막형성이 향상되었음.
피막형성제 토양주입을 이용한 식생피복녹화	100	- 피막형성제의 토양주입장치를 고안하였음. - 산성배수 발생 암석기원 토양에 피막형성제를 주입하고 seed spray를 사용하여 식생녹화를 원활히 수행하였음. - 토양에 피막형성제를 주입한 결과 토양 Al의 식물가용도가 저감되었음.
타분야 활용방안	100	- 산성배수가 발생되는 휴폐광산의 광미와 폐석처리에 성공적으로 적용할 수 있을 것으로 조사됨.
시공비용 산출 및 경제성 검토	100	- 시공비용 : 20,000원/㎡. - 숏크리트 공법과 비슷한 시공비가 산출되었으나 사후관리가 불필요하며 사면관리비용이 현격히 낮아지는 것으로 판명됨.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1절. 연구성과

(1차년도)

☐ 암반산성배수가 발생될 개연성이 있는 암석의 분포지역의 추출

기존의 지반에 대한 정보(지질도, 토양도, 관련논문)를 이용하여 황철석을 함유할 개연성이 있는 암석의 분포지역을 추출하고 현장조사를 통하여 암반산성배수가 발생여부를 확인하였다. 향후 건설공사과정에서 지반굴착에 의하여 암반산성배수가 발생될 개연성이 있는 암석은 강원도 일원에 분포하는 평안층군, 충청지역에 존재하는 옥천층군, 전남과 경남에 분포하는 중생대 백악기 화산암류, 포항지역에 분포하는 제3기 퇴적층과 화산암류, 국부적으로 존재하는 열수변질대인 것으로 밝혀졌다.

☐ 암석의 암반산성배수발생 가능성에 대한 평가기법 확립

21점의 현장시료를 대상으로 산발생능력과 산에 대한 중화능력을 평가하고 차이를 계산함으로서 향후 지반굴착에 의하여 지표에 노출될 시에 산성배수가 개연성에 대하여 평가하는 기법을 확립하였다.

☐ 암반산성배수에 의한 사면안정성 및 사면구조물의 영향파악

현장조사를 통하여 사면안정성, 구조물의 부식에 대한 조사가 이루어졌으며 실내시험을 통하여 산에 의한 암석의 풍화 및 콘크리트 부식현상을 정량적으로 파악하였다.

☐ 황철석의 산화반응기작 규명

표준 황철석을 대상으로 산화반응을 시험한 결과 반응초기 약 10시간 동안 산화가 급격히 진행되었으며 이후에는 pH 3으로 안정화가 되었다. 산화반응과정에서 Fe가 먼저 용출되고 난후에 SO_4^{2-} 가 용출되었다. 산화반응기작의 파악은 최적 피막형성조건을 도출에 기초 자료를 제공하였다.

☐ **피막형성의 핵심기술 확보**

피막형성의 효율성, 피막의 내구성, 경제성, 2차 환경오염의 유발을 고려했을 때 0.01M KH_2PO_4 , 0.01M H_2O_2 , pH 6(NaOAc 로 조절)가 최적의 피막형성제로 밝혀졌다.

☐ **연구결과 발표 실적**

학술회의 발표 : 4건

- 지반공학회 : 1) 산성암반배수에 의한 사면구조물의 피해현황
2) 건설현장 절취사면의 산성암반배수 발생특성과 잠재적 산발생능력 평가
- 자원환경지질학회 : 1) Accelerated weathering of pyrite bearing rocks using soxhlet extractor
2) 함황철석 편마암의 화학적 풍화에 의한 물성변화

전문학술지 게재 : 1건

- 1) 건설현장 절취사면의 산성암반배수 발생특성과 잠재적 산발생능력 평가.
자원환경지질학회지. 2005. 38:91-99.

(2차년도)

☐ **암석 유형별 최적피막형성조건 도출**

우리나라의 대표적인 산성암반배수 발생 암석인 안산암, 변성퇴적암, 제3기 퇴적암, 폐석탄을 대상으로 산성암반배수의 발생개연성을 평가하고 각 암석으로부터 발생될 산성암반배수를 억제할 수 있는 최적의 피막형성 조건을 도출하였다.

☐ **Silicate와 buffer를 이용한 황철석의 산화억제 기법 개발**

2차년도 연구과정에서 획득한 정보를 바탕으로 당초 계획에 포함되지 않은 silicat와 Na-OAC buffer를 이용한 황철석 산화억제기법을 확립함으로써 새로운 산성암반배수 발생억제기술을 개발하였다.

☐ **피막형성제가 콘크리트 강도에 미치는 영향파악**

피막형성제가 의한 콘크리트 강도에 미치는 영향을 정량적으로 파악하였다.

☐ **피막형성처리가 식생의 활착에 미치는 영향파악**

피막형성처리한 토양에서 무처리 대비 식생성장이 5배 이상 높은 것으로 파악

되었다.

□ **피막형성처리공법의 현장적용 시험시공**

충청북도 보은군에 산출되는 산성암반배수 발생 변성퇴적암 지역의 건설공사 현장의 암반사면과 성토사면을 대상으로 현장시험시공을 실시하였다. 피막형성제의 살포방법과 살포횟수를 파악하였으며 피막처리에 의한 효과를 모니터링 중이다.

□ **산성암반배수 발생개연성이 있는 암석의 평가기법 현장적용**

1차년도 연구에서 확립된 평가기법을 현장에 적용하여 효용성을 확인하였다.

□ **연구결과 발표 실적**

학술회의 발표 : 12건(국내 11건, 국제 1건)

- 지반공학회 : 1) 산성암반배수에 의한 사면구조물의 피해현황(2005)
 - 2) 건설현장 절취사면의 산성암반배수 발생특성과 잠재적 산발생능력 평가 (2005)
 - 3) 건설현장의 산성암반배수 발생저감을 위한 철인산염 피막형성 최적조건 도출 (2006)
 - 4) 산성암반배수에 의한 사면구조물의 부식과 식생공적용 실패사례 및 대책 (2006)
- 자원환경지질학회 : 1) Accelerated weathering of pyrite bearing rocks using soxhlet extractor(2005)
 - 2) 함황철석 편마암의 화학적 풍화에 의한 물성변화(2005)
 - 3) 산성암반배수 발생억제를 위한 철인산염 피막형성 연구(2006)
 - 4) 수산화철, 철규산염 피막형성을 이용한 산성암반배수 발생억제 연구(2006)
 - 5) 산성배수에 의한 콘크리트 부식에 따른 물리적 변화 특성 (2006)
 - 6) XPS를 이용한 표준 황철석 표면의 철인산염 피막 특성연구 (2006)
- 암반공학회 : 1) 터널굴착시 산성암반배수에 대한 습지영향 평가(2006)
- Asia Rock Mechanics Symposium 4th
 - 1) Effect of pyrite oxidation on mechanical properties of rocks and environment (2006)

전문학술지 게재 : 2건

- 1) 산성암반배수에 의한 절취사면 구조물의 피해현황 및 평가. 지반공학회지. 2005. 21:83-92.
- 2) 산성배수 발생저감을 위한 황철석 표면의 철인산염 피막형성 연구. 자원환경지질.

2006. 39:75-82.

기술자문 : 1건

1) 산성배수 발생 국도건설현장의 지질특성. (주)갑을건설. 2006. 10

(3차년도)

☐ 산성배수 발생 암사면의 피막형성처리 시험시공

충북 보은군 지방도 571호선 암사면에 피막형성처리 시험시공을 실시하였다. 피막형성처리 결과 사면배수는 시험시공지역의 우수의 평균 pH인 5.4와 유사한 수질을 확보하였다.

☐ 피막형성제 개선

1-2차년도 연구에서 획득한 피막형성제인 0.01M H_2O_2 -0.01M KH_2PO_4 에 0.1M Na_2CO_3 를 첨가한 결과 피막형성이 향상되었다.

☐ 산성배수 발생 암석기원 토양의 식생피복녹화

Al 독성이 높은 토양을 대상으로 피막형성제를 주입처리하고 ryegrass를 seed spray하여 성장을 관찰한 결과 무처리 토양에서는 1개월 후 식생이 고사하였으나 피막형성제를 주입한 토양에서는 식생성장이 양호하였다. 또한 피막형성제를 주입한 토양은 Al의 식물가용도가 저감되었음을 확인하였다.

☐ 피막형성처리가 식생의 활착에 미치는 영향파악

피막형성처리한 토양에서 무처리 대비 식생성장이 5배 이상 높은 것으로 파악되었다.

☐ 시공비용 산출 및 경제성 평가

암사면에 피막형성처리 비용은 숏크리트 타설 비용과 유사한 20,000원/m²로 산출되었다. 산성배수 발생억제효과는 숏크리트에 비해 월등히 높으며 사후관리가 필요치 않아 사면관리비용이 저감될 것으로 판단되었다.

☐ 타분야 활용성

피막형성처리는 건설현장뿐만 아니라 휴폐광산의 광미와 폐석으로부터 산성광산배수의 발생을 억제하는데 활용될 수 있을 것으로 판단되었다.

☐ 연구결과 발표 실적

학술회의 발표 : 10건(국내 7건, 국제 3건)

- 지반공학회

1) 산성암반배수에 의한 사면구조물의 부식과 식생공 적용의 실패사례 및 대

- 책 (2006)
- 2) 피막형성기법을 적용한 산성암반배수 발생 성토사면의 피복식물 발아 및 성장 특성 연구 (2006)
- 지질과학기술 공동학술대회
 - 1) 지하철 건설 예정구간 암반의 산성암반배수 발생 개연성 평가 및 피해저감대책 (2007)
 - 2) 산성암반배수 저감을 위한 피막형성기법을 적용한 특이산성토양의 화학적 변화와 피복식물의 성장특성 연구 (2007)
- 암반공학회 :
 - 1) An investigation of physicommechanical properties change of sulfide-bearing granitic gneiss by accelerated chemical weathering (2006)
- 건설현장 산성배수 심포지움 :
 - 1) 건설현장에서 산성배수의 특성
 - 2) 산성배수 발생억제를 위한 코팅기술
- ITA.-AITES World Tunnel Congress
 - 1) The measure for preventing acid rock drainage through the results of acid rock drainage appraisal and contamination transport numerical analysi (2007)
- AGU: Joint Assembly
 - 1) Germination and seedling growth of perennial ryegrass in acid sulfate soil treated by pyrite nano-encapsulation (2007)
- 1st Canada-US rock mechanics symposium
 - 1) Evaluation of mechanical and chemical properties of rock bearing pyrite by leaching test (2007)

초청강연 : 4건

- 1) 특이산성토물질로부터 산성배수 발생저감을 위한 microencapsulation 기법. 한국환경농학회 (2007)
- 2) 황철석의 산화에 환경오염 및 환경소재로서 활용. 친환경무기소재사업단 (2007)
- 3) 특이산성토물질로부터 산성배수 발생저감을 위한 microencapsulation 기법. 광해방지사업단 신입직원교육 (2006)
- 3) 특이산성토물질로부터 산성배수 발생저감을 위한 microencapsulation 기법. 광해방지사업단 신입직원교육 (2007)

전문학술지 게재 : 1건

- 1) 피막형성기법을 적용한 토양의 화학적 변화와 산성배수저감 효과. 광해방지 기술. 1: 111-121.

심포지움 개최 : 1건

- 1) 건설현장 산성배수 심포지움. 2007. 7. 12. 참석자 161명 (건설업계, 학교, 연구소, 공무원)

기술자문 및 지도 : 2건

- 1) 금산군 사찰건설 부지 산성배수 발생현황 및 대책. 금산군. 2007. 7
- 2) 중화층 물질의 특성 및 성능. 산수녹화산업(주). 2007. 7

특허출원 : 1건

- 1) 산성배수 발생억제 및 식생피복 축진을 위한 코팅제. 출원번호 : 10-2007-0069465. 출원일자 : 2007. 7. 1

제 2절. 활용계획

(1차년도)

☐ **암반산성배수 발생 개연성이 있는 지역 도출**

1차년도 문헌연구 및 현장 확인조사결과와 산물인 산성암반배수가 발생될 개연성이 있는 암석의 개략적인 추정 분포지역 지도는 향후 건설사업의 조사 설계의 기초 자료로 활용함으로서 건설현장에서 암반산성배수에 의한 피해의 저감에 이용할 수 있다. 또한 사회적 요구인 환경친화적인 건설사업 수행의 기초 자료로 활용될 수 있다. 암반산성배수가 발생될 개연성이 높은 지역의 지반은 금속에 대한 부식성이 강해 향후 금속관의 매설작업에서 부식방지대책 수립에 유용한 자료가 된다. 1차년도 연구결과는 개략적인 분포지역의 도출로서 향후 정밀조사를 통하여 정확한 분포지역에 대한 정보의 확보가 필요하다.

☐ **암석의 암반산성배수 발생 가능성에 대한 평가기법**

우리나라 지질에 적합한 평가기법을 확립함으로서 향후 지반조사 시 암반에 대한 정밀하고 신뢰성 있는 평가 수행에 활용할 수 있다.

☐ **암반산성배수 발생저감을 위한 피막형성의 핵심기술 확보**

2차년도의 현장 적용성 시험에 필요한 핵심기술을 확보함으로서 원활한 연구수행 및 기술개발이 용이해졌다.

☐ 기업화 및 기술이전

암석의 산성암반배수의 발생 개연성에 대한 평가방법과 절취사면에서 산성배수의 발생저감을 위한 기술력을 확보함으로서 지반/사면 조사 및 산성배수 발생저감 전문 업체의 창업이 가능할 것으로 판단된다. 또한 관련업체에 핵심기술의 이전이 가능하다.

☐ 타 산업에의 파급효과

암반산성배수의 발생은 폐광산에서 발생하는 산성광산배수의 발생과 유사한 기작으로 발생된다. 암반산성배수의 발생을 저감하기 위한 피막형성기술은 광산의 폐석과 광미로부터 발생하는 산성광산배수의 발생저감에 적용이 가능하다. 최근 광해방지법이 제정(2005.5)되어 광산정화사업이 활발히 진행될 것으로 예상된다. 1차년도에 확보된 암반산성배수의 발생저감을 위한 피막형성기술의 핵심기술은 광해방지사업의 산성광산배수의 발생저감에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

(2차년도)

☐ 암석 유형별 최적피막형성 조건 도출

우리나라의 대표적인 산성암반배수 발생 암석인 안산암, 제3기 퇴적암, 변성퇴적암, 폐석탄의 산성암반배수의 발생개연성에 대한 자료와 각 암석으로부터 발생하는 산성암반배수의 발생억제를 위한 최적의 피막형성 조건의 도출은 향후 각 암석이 분포하는 지역에서 수행될 건설사업의 환경친화적인 수행의 기초 자료가 된다. 각 암석별 산성암반배수의 발생억제를 위한 최적의 피막형성조건은 건설현장 및 기존사면에서 산성암반배수에 의한 피해를 저감할 수 있는 대책수립의 근간이 된다.

☐ Silicate와 Na-OAc buffer를 이용한 황철석의 산화억제 기술

실험실에서 개발한 산성암반배수 발생억제를 위한 신기술로서 향후 추가연구와 현장적용성 연구를 통하여 상용화기술로 발전되어야 한다.

☐ 피막형성제가 콘크리트 강도에 미치는 영향

피막형성제가 콘크리트의 강도를 약간 저하시키는 것으로 밝혀졌다. 피막형성처리 후 숏크리공법 적용의 참고사항이 된다.

☐ **피막형성처리에 의한 식생피복 촉진**

피막처리가 사면의 식생피복을 촉진시키는 것으로 밝혀졌다. 향후 식생피복이 어려운 산성암반배수 발생사면의 식생공 적용에 활용할 수 있다.

☐ **기업화 및 기술이전**

암석의 산성암반배수의 발생 개연성에 대한 평가방법과 절취사면에서 산성배수의 발생저감을 위한 기술력을 확보함으로써 지반/사면 조사 및 산성배수 발생저감 전문 업체의 창업이 가능할 것으로 판단된다. 또한 관련업체에 핵심기술의 이전이 가능하다.

☐ **타 산업에의 파급효과**

암반산성배수의 발생은 폐광산에서 발생하는 산성광산배수의 발생과 유사한 기작으로 발생된다. 암반산성배수의 발생을 저감하기 위한 피막형성기술은 광산의 폐석과 광미로부터 발생하는 산성광산배수의 발생저감에 적용이 가능하다. 최근 광해방지법이 제정(2005.5)되어 광산정화사업이 활발히 진행될 것으로 예상된다. 1차년도에 확보된 암반산성배수의 발생저감을 위한 피막형성기술의 핵심기술은 광해방지사업의 산성광산배수의 발생저감에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

(3차년도)

☐ **산성배수 발생 암사면의 산성배수 발생억제 기술**

현장시험시공을 통하여 산성배수 발생억제 효능이 입증된 피막형성기술은 향후 건설현장에서 절취면을 대상으로 사면안정성 증대, 환경오염방지에 활용할 수 있다.

☐ **산성배수 발생 암편으로부터 산성배수 발생억제 기술**

굴착암석을 피막처리함으로써 산성배수의 발생을 억제할 수 있어 굴착암석을 안전하게 성토재로서 재활용하는데 활용될 수 있다.

☐ **피막형성제의 토양주입 및 식생피복기술**

AI 독성이 높아 식생피복에 많은 어려움이 있는 산성배수 발생 암석기원 토양의 원활한 식생피복에 활용될 수 있다.

☐ **경제성 및 타분야 활용**

산성배수 발생억제를 위한 피막형성기술의 현장적용비용은 숯크리트 타설과 비슷하고 숯크리트 타설에 비해 유지관리비용이 월등히 적음으로 경제성이 뛰어나

다. 피막형성기술은 휴폐광산을 대상으로 하는 광해방지사업에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

☐ 기업화 및 기술이전

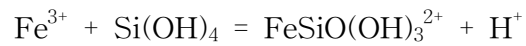
본 연구에서 개발된 피막형성기술은 향후 건설신기술과 환경신기술 지정신청을 할 예정이며 관련기업에 기술을 이전하여 건설 및 환경현장에 적용할 예정이다.

☐ 타 산업에의 파급효과

암반산성배수의 발생은 폐광산에서 발생하는 산성광산배수의 발생과 유사한 기작으로 발생된다. 암반산성배수의 발생을 저감하기 위한 피막형성기술은 광산의 폐석과 광미로부터 발생하는 산성광산배수의 발생저감에 적용이 가능하다. 최근 광해방지법이 제정(2005.5)되어 광산정화사업이 활발히 진행될 것으로 예상된다. 본 연구에서 확보된 산성배수의 발생저감을 위한 피막형성기술의 핵심기술은 광해방지사업의 산성광산배수의 발생저감에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

황철석의 산화 방지를 통한 산성배수 저감기술 중 본 연구에서는 인산염 피막형성 기술을 적용하였다. 이외에 Zhang and Evangeolu(1998)는 황철석 표면에 규산염 피막을 형성하여 산성배수 발생을 억제하는 연구를 수행한 바 있다. 규산염 피막형성 기술은 황철석의 산화시 표면으로부터 나오는 Fe^{3+} 과 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 가 결합하여 다음의 반응과정을 통해 철규산염을 형성하는 것으로 이론적인 배경은 철인산염 피막형성 기술과 같다.



철규산염 피막형성 기술은 추후 철인산염 피막형성 기술과 비교하여 피막형성제 제조의 용이성, 피막의 효율성, 내구성, 2차오염의 영향, 시공시 경제성 등을 검토할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

제 7 장 참고문헌

- Allison, J.D., et al. (1991) MINTEQA2/PRODEFA2; A geochemical assessment model for environmental systems: Version 3.0, User'manual. EPA/600/3-91/021, 105p.
- Amacher, M.C., Brown, R.W., Siddle, R.C., Amacher, J.K., 1995. Effect of mine waste on element speciation in headwater streams. In: Allen, H.E., Huang, Anderson, P.R. and Benjamin, M.M. (1985) Effects of silicon on the crystallization and adsorption properties of ferric oxides. *Env. Sci. Tech.*, 17, 686-692.
- Cheong, Y. W. and Thornton, I., 1994. Acid Mine Drainage and Heavy Metal Contamination of Stream Sediments in the Okdongcheon Stream, Sangdong Area, South Korea. *Environmental Geology*, 27, 1, p. 101-113.
- Clevenger, T.E., 1990. Use of sequential extraction to evaluate the heavy metals in mining waste. *Water Air and Soil Pollution* 50, 3, 4, p. 241-255.
- Cooper, D.C., Morse, J.W., 1998. Extractability of metal sulfide minerals in acidic solutions: application to environmental studies of trace metal contamination within anoxic sediments. *Environment Science and Technology*, 32, p. 1076-1078.
- Cottenie, A., Verloo, M., 1984. Analytical diagnosis of soil pollution with heavy metals. *Fresenius Z. Analytical Chemistry*, 317, p. 389-393.
- Davis, A., Drexler, J.W., Ruby, M.V., Nicholson, A., 1993. Micromineralogy of mine wastes in relation to lead bioavailability, Butte, Montana. *Environment Science and Technology*, 27, p. 1415-1425.
- Davis, A., Ruby, M.V., Bloom, M., Xchoof, R., Bergstrom, P.D., 1996. Mineralogic constraints on the bioavailability of arsenic in smelter impacted soils. *Environment Science and Technology*, 30, p. 392-399.
- Dugan, P.R. and Apel, W.A. (1983) Bacteria and acid drainage from coal refuse: Inhibition by sodium lauryl sulfate and sodium benzoate. *Appl. Env. Microbio.*, 46, 279-282.

- E.P., Bailey, G.W., Bowers, A.R., (Eds.), Metal Speciation and Contamination of Soil. Lewis, Chelsea, MI, 275–309.
- Frossard, E., Fardeau, J.C., Brossard, M., Morel, J.L., 1994. Soil isotropically exchangeable phosphorus: a comparison between E and L values. Soil Science Society of American Journal, 58, p. 846–851.
- Fuge, F., Pearce, N.J.G., Perkins, W.T., 1993. Geochemistry of Cd in the secondary near abandoned metalliferous mines in Wales. Applied Geochemistry, 2, p. 8–35.
- Hong, W.P. and Han, J.G.(1994) : "Measures to Control Landslides in Korea", Proc North-East Asia Sym. & Field Workshop on Landslides and Debris Flows (Presses) (in Korean), Seoul, Korea, pp.155–210.
- Hong, W.P. and Han, J.G.(1996) : "The Behavior of Stabilizing Piles Installed in Slopes", Proc., 7th ISL, Trondheim, Norway, Vol. 3, pp. 1709–1714.
- Humez, N., Humez, A.L., Juste, C., Prost, R., 1997. A new assessment of mobility of elements in sediments and wastes. Chemical Speciation and Bioavailability, 9, 2, p. 57–65.
- Jeng, A. S., Bergseth, H., 1992. Chemical and mineralogical properties of Norwegian alum shale, with special emphasis on heavy metals content and availability. Acta Agriculture of Scandinavia, Section B, soil and Plant Science, 42, p. 88–93.
- Jung, M. C. and Thornton, I., 1996. Heavy metal contamination of soil and plants in the vicinity of a lead-zinc mine, Korea. Applied Geochemistry, 11, p. 53–59.
- Kedziorek, M.A.M., Dupuy, A., Bourg, A.C., Compere, F., 1998. Leaching of Cd and Pb from a polluted soil during the percolation of EDTA: laboratory column experiments modeled with a nonequilibrium solubilization wtep. Environment Science and Technology, 32, p. 1609–1614.
- Kleinmann, R.L.P. and Hedin, R.S, 1993, Treat mine water using passive methods, Pollution Engineering, Vol. 20, p. 20–22
- Livingstone, D.A. (1963) Chemical compositions of rivers and lakes. USGS Prof.

Paper 440-G.

- McLaren, R.G., Crawford, D.V., 1973. Studies on soil copper. I. The fractionation of copper in soils. *Journal of Soil Science* 24, p. 172-181.
- Murr, L.E. and Mehta, A.P. (1982) Coal desulfurization by leaching involving acidophyllic and thermophyllic microorganism. *Biotech. Bioeng.*, 24, 743-748.
- Nordstrom, D.K. (1982) The effect of sulfate on aluminum concentrations in natural waters: Some stability relations in the system $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$ at 298oK. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 681-692.
- Nriagu, J.O. 1972. Solubility equilibrium constant of strengite. *Am. J. Sci.* 272, 476-484.
- Nyavor, K. and Egiebor, N.O. (1995) Control of pyrite oxidation by phosphate coating. *Sci. Total Environ.*, 162, 225-237.
- Powell, J.D. (1988) Origin and influence of coal mine drainage on streams of the United States. *Env. Geol. Water Sci.*, 11, 141-152.
- Ruby, M.V., Davis, A., Schoof, R., Everle, S., Sellstone, C.M., 1996. Estimation of lead and arsenic bioavailability using a physiologically based extraction test. *Environment Science and Technology*, 30, p. 422-430.
- Sauerbeck, D.R., Hein, A., 1991. The nikel uptake from different soils and its prediction by chemical extractions. *Water Air and Soil Pollution*, 57-58, p. 861-862.
- Ščančar J., Milačič, R., Stražar, M., Burica, O., 2000. Total metal concentrations and partitioning of Cd, Cr, Cu, Fe, Ni and Zn in sewage sludge. *Science of The Total Environment*, 250, p. 9-19.
- Schuster, R.L.(1992) : "Keynote paper : Recent Advances in Slope Stabilization", *Proc. of 6th ISL, Christchurch, New Zealand*, pp.1715- 1745.
- Sengupta, M. (1993) Environmental impacts of mining: Monitoring, restoration, and control. Lewis, 494p.
- Singh, S.P., Tack, F.M.G., Verloo, M.G., 1996. Extractability and bioavailability of heavy metals in surface derived from dredged sediments. *Chemical*

- Speciation and Bioavailability, 8, 3/4, p. 105-114.
- Sobek, A.A. (1990) Successful reclamation using controlled release bactericides. Am. Soc. Surf. Mining and Reclam. Conf., Charleston, WV.
- Soon, Y.K., Bates, T.E., 1982. Chemical pools of Cd, Ni and Zn in polluted soil and some preliminary of their availability to plants. Journal of Soil Science, 33, p. 477-488.
- Stumm, W. and Morgan, J.J. (1981) Aquatic chemistry, 2nd Ed. John Wiley and Sons, 780p.
- Sullivan, P.J., et al. (1988) Iron sulfide oxidation and the chemistry of acid generation. Env. Geol. Water Sci., 11, 289-295.
- Tessier, A., Campell, P.G.C. and Bisson, M., 1979, Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. Analytical Chemistry, 51, p. 844-851.
- Walder, I.F., Chavez Jr, W.X., 1995. Mineralogical and geochemical behavior of mail tailing material produced from lead-zinc skarn mineralization, Hanover, Great County, New Mexico, USA. Environmental Geology, 26, p. 1-18.
- Webb, J.A. and Sasowsky, I.D. 1994) The interaction of acid mine drainage with a carbonate terrane; evidence from the Obey River, north-central Tennessee. J. Hydrol., 161, 327-346.
- Wiggering, H. (1993) Sulfide oxidation- An environmental problem within colliery spoil dumps. Env. Geol., 22, 99-105.
- Yaman, M and I. Akdeniz. 2006. Fractionation of aluminum and relation to its concentration in fruits. Environ. Monit. and Assess. 115: 270-289.
- Yu, J (1994) Adsorption of trace metals on the natural amorphous iron oxyhydroxide from the Taebag coal mine area. J. Korean Soc. of Groundwater Env., 1, 23-32.
- Zaihua, L., et al. (1991) Effect of coal mine waters of variable pH on spring water quality: A case study. Env. Geol. Water Sci., 17, 219-225.
- Zhang, Y.L. and Evangelou, V.P. (1998) Formation of ferric hydroxide-silica

coatings on pyrite and its oxidation behavior. Soil Science, 163, 53-62.

김경웅, 백성희, 이현구, 1995. 유구-광천 금은광화대지역에서의 토양 및 농작물의 중금속오염, 자원환경지질학회지, 28, 4, p. 389-394.

김경웅, 홍영욱, 김택남, 1996. 달성광산 주변지역에서의 중금속 오염과 이의 제거 방안. 자원환경지질학회지, 29, p. 57-63.

김경호, 나현준, 이성택, 1997. 산성광산폐수 처리용 생물반응기에 사용되는 유기물의 연구. 한국토양환경학회지, 2, 1, p. 45-50.

김근수, 황진연, 박맹언, 1999. 일광광산 주변의 산성배수 및 토양의 중금속 오염 특성, 대한지하수환경학회. 한국토양환경학회 정기총회 및 춘계 공동 학술발표회, p. 50.

김상현, 전효택, 1993. 삼보 연-아연-중정석 광산 주변 토양에서의 중금속오염 연구, 한국자원공학회지, 30, p. 228-237.

김선태, 윤양희, 박제안, 심의섭, 1999. 구봉광산 주변 토양에서의 중금속과 시안의 분포, 한국토양환경학회지, 4, 1, p. 35-47.

김선태, 윤양희, 박제안, 심의섭, 1999. 진곡광산 광미와 주변 토양의 오염조사, 토양환경학회지, 4, 2, p. 175-183.

김정엽, 전효택, 오대균, 1995. 동해 폐탄광 일대 산성 광산폐수의 중화처리. 지하수 환경, 2, 1, p. 38-47.

김종욱, 문희수, 송윤구, 유장한, 1999. 구봉광산 일대 광미,하상퇴적물 및 주변 토양에서의 중금속 원소의 존재 형태, 자원환경지질, 32, 3, p. 261-271.

나춘기, 전서령. 1995. 모악 금.은광산에 방치된 폐석이 주변 수계 및 생태계에 미치는 환경적 영향. 자원환경지질, 28, 3, p. 221-229.

민정식, 정영욱, 권광수, 이현주, 1997. 폐탄광 및 폐금속광 갱내수 수질오염 방지대책. 자원연구소 논문집, 1, 2, p. 63-71.

박종진, 김명균, 전효택, 1997. 금왕 금.은광산 주변 지구화학적 환경에서의 중금속 원소들의 분산. 자원환경지질, 30, 5, p. 407-416.

박천영, 박영석, 정연중, 1995. 광양광산 주변 토양의 중금속 오염에 관한 연구. 한국자원공학회지, 32, p. 163-174.

박천영, 정연중, 1999. 광양광산 산성광산배수내 중금속 원소 함량의 계절적인 변화 특성. 한국자원공학회지, 36, 91-102.

- 박천영, 정연중, 김성구, 2001. 광양 폐금광 수계에 형성된 철수산화물에 대한 광물학적 및 지구화학적 특성. 지구과학회지, 22, 3, p. 208-222.
- 송석환, 민일식, 김명희, 이현구, 1997. 금산 대성 탄광지역 산성폐수에 의한 오염. 자원환경지질, 30, 2, p. 105-116.
- 오대균, 김정엽, 전효택, 1995. 동해탄광 주변 산성광산폐수와 하상퇴적물의 지구화학. 자원환경지질, 28, 3, p. 213-220.
- 유장한, 1998. 충남 구봉광산지역 광미, 하상퇴적물 및 토양의 광물학적 특성과 중금속원소의 존재형태 연구. 연세대학교 박사학위 논문, 148p.
- 이기철, 이승길, 한인호, 최광호, 정덕영, 1998. 금정광산 주변 토양의 중금속 오염 현황 및 그 처리 방안. 대한지하수환경학회.한국토양환경학회공동 심포지엄 및 추계학술대회 논문집, p. 189-194.
- 이도경, 정덕영, 이규승, 1997. 구봉광산 주변 중금속의 분포양상 및 인근 농경지와 하천수계에 미치는 영향. 한국토양환경학회지, 2, p. 69-80.
- 이무성, 전서령, 나춘기, 정재일, 1996. 동진 금.은.동광산 주변에 방치된 폐석의 환경적 영향. 자원환경지질, 29, p. 45-55.
- 이순영, 1993. 경산폐광산 부근의 토양, 하천수 및 식생의 중금속 오염에 관한 지구화학적 연구. 경북대학교 석사학위 논문, 66p.
- 이인호, 이재영, 김석기, 1998. 달성폐광산 주변 식물의 중금속 오염에 대한 지화학적 연구. 자원환경지질, 31, p. 223-233.
- 이재영, 김종근, 이인호, 이진국, 1993. 경북지역 폐금속 광산이 환경에 미치는 영향. 광산지질, 26, p. 465-472.
- 이재영, 이인호, 이순영, 1996. 금속 폐광산 주변의 토양, 식물 및 하천의 중금속오염에 대한 지화학적 연구(달성 및 경산광산). 자원환경지질, 29, p. 597-613.
- 이종표, 1997. 덕음광산 주변 토양의 중금속 오염 특성, 조선대학교 석사학위논문, 93p.
- 이진국, 이재영, 1998. 광산폐석의 효과적 처리를 위한 지화학적 연구. 한국토양환경학회지, 3, p. 31-44.
- 이찬희, 이현구, 이종창, 1998. 나립광산 수계의 토양과 퇴적물에 관한 지구화학적 특성. 자원환경지질, 31, p. 297-310.
- 이현구, 이찬희, 1998. 충주호 상류, 상곡광산의 수계에 분포하는 토양과 퇴적물의

- 지구화학적 오염. 지하수환경, 5, p. 10-20.
- 이현구, 이찬희, 유봉철, 조애란, 1998. 삼광 금.은광산 일대의 하상퇴적물과 토양 내 함유된 환경적 독성원소의 지구화학적 부화와 이동. 자원환경지질, 31, p. 111-125.
- 전동진, 전효택, 전용원, 1995. 신예미 Pb-Zn-Fe 광산과 거도 Cu-Fe광산 주변 토양.하상 퇴적물 및 하천수의 중금속 오염. 한국 자원공학회지, 32, p. 409-423.
- 전효택, 김주용, 안주성, 제현국, 1999. 길곡 금은광산 주변지역의 중금속오염 평가. 대한자원환경지질학회.한국자원공학회 공동학술발표회논문집, 31, p. 8~320.
- 전효택, 황지호, 1998. 폐석탄광주변 지구화학적 환경의 중금속 오염 평가.도계 탄광 부근수계에서의 산성광산배수의 지구화학. 한국자원공학회지, 35, p. 491-500.
- 정덕호, 1998. 전주일광산 부근의 지질. 전북대학교 대학원 석사학위 논문, 36p.
- 정명채, 1996. 달성 Cu-W광산 주변 수계의 하상퇴적물과 자연수의 Cd, Cu, Pb 및 Zn 오염. 자원환경지질, 29, p. 305~313.
- 정영국, 민정식, 이현주, 권광수, 1997. 벚지 및 우분을 이용한 산성광산배수 정화. 대한지하수환경학회지, 4, 3, p. 116~121.
- 정영욱, 민정식, 권광수, 이현주, 1997, 광산폐수정화용 소택지의 기질물질 효율성 평가, 한국자원공학회, 34.
- 조현순, 1998. 석담광산 주변 토양, 하상퇴적물 및 식물 중금속 원소의 지구화학적 분산. 강원대학교 석사 학위 논문, 65p.
- 차종문, 전효택, 전용원, 1999. 노화납석광산 일대 자연수의 지구화학과 산성광산폐수의 중화처리. 대한자원환경지질학회.한국자원공학회 공동학술발표논문집, p.36-38.
- 최정찬, West, T. R., 1994. 광산 산성수 처리를 위한 인산염 자갈의 침전제로서의 역할 평가. 한국지하수환경학회지, 1, 1, p. 16~22.
- 한국지질자원연구원 (2002) 산화광물로 처리된 모래를 이용한 광산폐수 고도처리 연구 보고서. 산업자원부, pp. 134.
- 한국지질자원연구원 (2002) 폐금속광산 환경 오염평가 및 정화기술 연구 연차보고서. 국무총리실, pp. 300.
- 한국지질자원연구원 (2003) 산사태 예측 및 방지기술 연구 보고서. 자연재해방재기

술사업. 과학기술부, pp. 326.

한국지질자원연구원 (2003) 전국 지구화학적 재해 평가기준도 작성 연구보고서. 자연재해방재기술사업. 과학기술부, pp. 225.

한국지질자원연구원 (2003) 폐금속광산 환경 오염평가 및 정화기술 연구 최종보고서. 국무총리실, pp. 223.

홍영국, 지세정, 1999. 일광폐광산 토양의 중금속원소 오염과 존재형태, 대한자원환경지질학회 춘계 공동학술발표회, p. 50~51.

황은하, 위수민, 이평구, 최상훈, 2000, 서성 연-아연광산 주변 농경지 토양의 중금속 오염연구, 한국토양환경학회, 5, 2, p. 67-85.

황호송, 전효택, 1995. 시흥 Cu-Pb-Zn 광산 주변에서의 중금속 원소들의 분산 및 존재형태와 흡착처리. 자원환경지질, 28, p. 455~467.

주 의 사 항

1. 본 보고서는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업의 최종(중간) 연구보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업임을 밝혀야 합니다.
3. 국가보안 차원에서 필요하다고 인정되는 내용은 대외적으로 발표 및 공개하여서는 아니됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

■ 문의처 : 한국건설교통기술평가원	TEL 031)381-6311
한국지질자원연구원	TEL 042)868-3658
(주)넥스지오	TEL 02)448-6953

R&D / 04핵심기술- A02-04

도로건설 절취사면의 산성배수 발생저감을 위한 피막형성 기술 개발

■ 발행일 / 2007. 8. .

■ 발행처 / 한국지질자원연구원

대전광역시 유성구 가정동 30번지

TEL : 042-868-3114(대)

■ 인쇄처 / 한국지질자원연구원