



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

복합슬래그와 중화·코팅제로 개량된 제 3기 이암  
성토구조체의 특성

Characteristics of Banking Structures Constructed with Improved  
Tertiary Mudstone with Composite Slag and Neutralizing and  
Coating Agents



지도교수 김 태 형

2020년 2월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

백 인 우

본 논문을 백인우의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 : 송 영 석 (인)

위 원 : 김 낙 영 (인)

위 원 : 김 태 형 (인)

2019년 12월 16일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iv
List of Figures .....	vi
Abstract .....	ix

## 1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적 .....	1
1.2 연구 내용 .....	3

## 2. 기존 연구자료

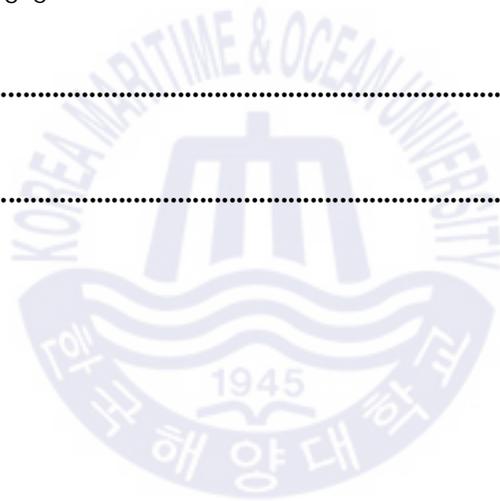
2.1 제 3기 이암의 특성 .....	4
2.1.1 이암의 물리적 특성 .....	4
2.1.2 이암의 공학적 특성 .....	5
2.1.3 이암의 공학적 분류 .....	9
2.2 철강슬래그의 특성 .....	13
2.2.1 철강슬래그의 물리적 특성 .....	13
2.2.2 철강슬래그의 공학적 특성 .....	16
2.3 중화·코팅제의 특성 .....	21
2.3.1 중화·코팅제 처리 필요성 .....	21
2.3.2 중화·코팅제 처리 기술 .....	21
2.4 산성 배수 .....	24
2.4.1 산성배수 발생 메커니즘 .....	24
2.4.2 산성배수 발생 저감 기술 .....	28

## 3. 연구 방법

3.1 시료선정 및 채취 .....	30
3.1.1 제 3기 이암 .....	30

3.1.2	복합슬래그	31
3.1.3	중화·코팅제	31
3.2	실내시험	32
3.2.1	시료의 물리·화학적 분석	32
3.2.2	산성배수 발생 및 개연성 평가	35
3.2.3	빗물에 의한 산성배수 발생속도 분석	39
3.2.4	복합슬래그의 중화능력 평가	39
3.2.5	배합설계기준 및 방법	40
3.3	현장시험	42
3.3.1	성토구조체 설계	42
3.3.2	성토구조체의 노체기준 평가	43
3.3.3	성토구조체 모니터링 계측 시스템	44
3.3.4	사후처리구간 중화·코팅제 주입	46
4.	<b>연구 결과 및 고찰</b>	
4.1	실내시험 결과	48
4.1.1	이암의 입도분류와 물성 분석	48
4.1.2	이암의 화학적 분석	55
4.1.3	이암의 산성배수 발생 개연성 평가	59
4.1.4	빗물에 의한 이암의 산성배수 발생속도 예측	63
4.1.5	복합슬래그의 성분 및 중화능력 분석	65
4.1.6	개량재를 이용한 배합설계 선정	69
4.2	성토구조체 시공	74
4.2.1	성토구조체 시공과정	74
4.2.2	설계기준 평가 및 적정성 검토	76
4.3	성토구조체 모니터링 계측 데이터 해석	79
4.3.1	pH	80
4.3.2	함수량	81

4.3.3	침하량 .....	83
4.4	성토구조체의 구간별 실증시험 결과 .....	84
4.4.1	사전처리구간 .....	84
4.4.2	사후처리구간 .....	85
4.4.3	가적치구간 .....	89
5.	결론	
5.1	연구 결과 .....	90
5.2	향후 연구 방향 .....	92
	감사의 글 .....	94
	참고문헌 .....	95



## List of Tables

Table 2.1	Percentage of swelling clay in rocks by geological age .....	4
Table 2.2	Weathering grades of weak and weathered rock .....	10
Table 2.3	Godfrey' s slaking grade .....	12
Table 2.4	Chemical composition of representative sulfide minerals .....	24
Table 2.5	Acid rock drainage treatment technology .....	28
Table 2.6	Acid rock drainage suppression technology .....	29
Table 3.1	“Fizz Ratings“ and Associated Acid Quantities and Concentrations to be used in the ANC Determination .....	36
Table 3.2	Recommended ANC Ranges for Each Fizz Rating .....	36
Table 3.3	NaOH titration molar value according to NAG pH .....	37
Table 3.4	An indication of the acid potential of a sample .....	37
Table 3.5	Material standard of bed filled up ground .....	41
Table 3.6	Calculation method of mixing ratio .....	42
Table 4.1	Measurement results of particle size analysis .....	49
Table 4.2	Physical characteristics of the mudstone .....	50
Table 4.3	Soil Classification Chart .....	51
Table 4.4	XRF analysis results .....	52
Table 4.5	Analysis results of pH, EC in distilled water condition .....	55
Table 4.6	Cation analysis result of mudstone .....	57
Table 4.7	Anion analysis result of mudstone .....	58
Table 4.8	Elemental analysis result of mudstone .....	59
Table 4.9	ANC test result of mudstone .....	60

<b>Table 4.10</b>	NAG pH test result of mudstone .....	60
<b>Table 4.11</b>	The results of acid base accounting test of the mudstone ...	61
<b>Table 4.12</b>	Grain-size distribution of the MS-25 .....	65
<b>Table 4.13</b>	XRF analysis results of the MS-25 .....	65
<b>Table 4.14</b>	Cation analysis result of the MS-25 .....	66
<b>Table 4.15</b>	Correlation of material .....	67
<b>Table 4.16</b>	Required MS-25 rate by sulfur .....	67
<b>Table 4.17</b>	Required MS-25 amount by sulfur .....	68
<b>Table 4.18</b>	Results of physical test on samples with different mixtures ·	69
<b>Table 4.19</b>	Results of mechanical test on samples with different mixtures	70
<b>Table 4.20</b>	Correlation ratio of S : MS-25 .....	73
<b>Table 4.21</b>	Results of field density test .....	76
<b>Table 4.22</b>	Results of plate bearing test .....	77
<b>Table 4.23</b>	Results of triaxial permeability coefficient test .....	79
<b>Table 4.24</b>	Calculation of neutralizing and coating agent injection amount in post-processing section .....	85
<b>Table 4.25</b>	Measurement results of pH from post-processing section .....	87

## List of Figures

<b>Fig. 1.1</b> Damaged cut slope and structure by acid rock drainage .....	2
<b>Fig. 2.1</b> General slaking process of mudstone .....	6
<b>Fig. 2.2</b> Geologic structure expected to slope-collapses on a slope contained mudstone .....	7
<b>Fig. 2.3</b> Drying and absorption condition model of rock .....	8
<b>Fig. 2.4</b> Occurring factors for clay swelling phenomenon .....	9
<b>Fig. 2.5</b> Two parts of classification scheme based on minimum 50% clay sized particles .....	11
<b>Fig. 2.6</b> Generation of slag in the steel process .....	13
<b>Fig. 2.7</b> Classification of steel slag .....	14
<b>Fig. 2.8</b> Hydration reaction of blast furnace slag .....	18
<b>Fig. 2.9</b> Dissolution mechanism of an aluminosilicate glass during the early stage of reaction .....	19
<b>Fig. 2.10</b> Distribution of acid rock drainage in South Korea .....	27
<b>Fig. 3.1</b> Sampling location of mudstone in Pohang .....	30
<b>Fig. 3.2</b> Flow Chart showing ARD screening tests, decision nodes and ARD rock type categories .....	38
<b>Fig. 3.3</b> Relations between S and MS-25 .....	39
<b>Fig. 3.4</b> Detail drawing of banking structure field test .....	43
<b>Fig. 3.5</b> Detail drawing of field monitoring system .....	45
<b>Fig. 3.6</b> Field monitoring system program .....	45
<b>Fig. 3.7</b> Detail drawing of neutralizing and coating agent injection test .....	46

Fig. 4.1 Results graph of particle size analysis .....	48
Fig. 4.2 Soil Texture Triangle .....	49
Fig. 4.3 Grain-size distribution curve .....	50
Fig. 4.4 X-ray diffraction patterns of mudstone (EN-R1) .....	53
Fig. 4.5 X-ray diffraction patterns of mudstone (EN-R2) .....	54
Fig. 4.6 X-ray diffraction patterns of mudstone (EN-R3) .....	54
Fig. 4.7 X-ray diffraction patterns of mudstone (EN-R4) .....	55
Fig. 4.8 Safety factor graph from ANC/MPA .....	62
Fig. 4.9 Geochemical classification plot .....	62
Fig. 4.10 Changing pH of acid rock by rainwater .....	64
Fig. 4.11 X-ray diffraction patterns of the MS-25 .....	66
Fig. 4.12 Changing pH by addition of MS-25 .....	68
Fig. 4.13 Results graph of compaction test on samples with different mixtures .....	71
Fig. 4.14 Overall results of mechanical test .....	72
Fig. 4.15 Cross section and construction flowchart of banking structure	74
Fig. 4.16 Photos of construction processes of banking structure .....	75
Fig. 4.17 Relative compaction graph by section .....	77
Fig. 4.18 Measurement results graph of plate bearing test .....	78
Fig. 4.19 Measurement results of pH from banking structure .....	80
Fig. 4.20 Measurement results of moisture content from pre-processing section .....	81
Fig. 4.21 Measurement results of moisture content from post-processing section .....	82
Fig. 4.22 Measurement results of settlement from banking structure .....	83
Fig. 4.23 Measurement results of pH from pre-processing section .....	84
Fig. 4.24 Photos from neutralizing and coating agent injection test of post-processing section .....	86

Fig. 4.25 pH measurement graph of post-processing section ..... 88  
Fig. 4.26 pH measurement location of post-processing section ..... 88  
Fig. 4.27 Removing concrete pavement of temporary-stacking section .. 89



# Characteristics of Banking Structures Constructed with Improved Tertiary Mudstone with Composite Slag and Neutralizing and Coating Agents

Baek, In Woo

Department of Civil and Environmental Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

This study suggests the solution through the field substantiation test of the banking structure treated with composite slag and neutralizing and coating agent to utilize the tertiary mudstone as civil engineering material.

Slacking, swelling, and acid drainage were expected as a result of laboratory tests for the physical, mechanical and chemical characteristics of the tertiary mudstones in Pohang, Korea. In order to solve the expected problem, the tertiary mudstone was mixed with composite slag by 10%, and the neutralizing and coating agent was used to generate latent hydraulic property and to prevent natural weathering.

Three banking structures were constructed as one mixing designs pre-processing section, remainder post-processing section, and temporary-stacking section. In addition, a monitoring measurement system was installed to measure pH, water content, and settlement to check the constructability of the structure.

As a result of measurement, the pre-processing section remained stable due to the mixing design. On the other hand, the post-processing section, which natural weathering proceeded rapidly, secured stability and constructability through neutralizing and coating agent injection test. As temporary-stacking section was confirmed temporary neutralization and coating effects, the solutions proposed to utilize the tertiary mudstone as a civil engineering material are certainly proved.

**KEY WORDS:** Tertiary mudstone, Composite slag, Slaking, Swelling, Acid drainage



# 복합슬래그와 중화·코팅제로 개량된 제 3기 이암 성토구조체의 특성

백 인 우

한국해양대학교 대학원  
토목환경공학과

## 초 록

본 연구는 제 3기 이암을 토목 재료로 활용하기 위해서 복합슬래그와 중화·코팅제로 처리한 성토구조체 현장실증시험을 통해 활용방안을 제시하는 것이다. 우리나라 포항지역에 분포하는 제 3기 이암은 물리·역학적 특성과 화학적 특성을 실내시험을 통해 분석한 결과 슬레이킹이나 팽윤, 산성배수 발생이 예상되었다. 예상되는 문제를 공학적으로 해결하기 위해 제 3기 이암 10%를 복합슬래그(제강 70%, 고로 30%)로 치환하였으며, 복합슬래그의 잠재수경성 발현과 자연 풍화를 방지하기 위해 중화·코팅제로 처리하였다. 실증을 위하여 성토구조체를 사전처리구간, 사후처리구간, 가적치구간으로 구분하여 시공하였으며, 평가를 위해서 모니터링 계측 시스템을 설치하여 pH, 함수량, 침하량을 측정하였다. 사전처리구간은 배합설계로 인해 안정이 유지되고 있었으며, 무처리로 시공된 사후처리구간은 자연 풍화가 빠르게 진행되고 있어 이를 보완하기 위해 중화·코팅제 주입 시험을 실시하여 안정성 및 시공성을 확보하였다. 가적치구간도 일시적 중화·코팅제 효과가 확인됨에 따라 제 3기 이암을 토목 재료로 활용하기 위해 제시한 해결방안을 확증했다.

**KEY WORDS:** 제 3기 이암, 복합슬래그, 슬레이킹, 팽윤, 산성배수

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

최근 국가균형발전 목표와 민간투자사업의 증가로 포항지역에서 교량이나 항만, 고속도로, 도시개발사업과 같은 건설 공사가 날로 증가하고 있다. 또한 향후 지속 발전 가능한 모델 형태의 도시개발계획도 활발하게 추진되고 있다. 하지만 토공 시 사용되는 양질의 토사를 구하기 힘들어져 포항지역 내 존재하는 제 3기 이암을 이용하려는 시도가 아울러 진행되고 있다. 제 3기 이암으로 구성된 자연사면을 절취하여 건설 현장 내 성토재나 채움재, 인공사면 등으로 시공하였을 때 사면파괴나 지반침하와 같은 역학적 문제와 산성배수가 발생하여 콘크리트를 부식시키거나 주변 환경을 오염시키는 복합적인 문제가 발생하고 있는 실정이다(Fig. 1.1).

제 3기 이암의 역학적 문제로 인한 피해를 줄이기 위해서는 무엇보다 포항지역의 지질학적 특성을 이해하는 것이 우선적으로 요구된다. 포항지역은 양산단층의 동쪽에 위치해 있으며, 신생대 제 3기층인 연암퇴적층이 광범위하게 분포되어 있다. 제 3기 이암은 노출 시 외관상 단단한 암반으로 보이므로 강도를 과대평가할 수 있는데, 이암의 주성분은 점토광물로 구성되어 있는 해양기원의 퇴적암으로 완전한 고결화가 이루어지지 않고 층리가 발달하여 여러 조암광물이 층리 사이에 퇴적되어 있으며, 흡수율이 높고 건습작용과 같은 풍화작용에 매우 취약하므로 토공 재료로 활용 시 적합한 검토와 조사가 필히 요구된다(Ban et al., 2015).

제 3기 이암에서 산성배수가 발생하여 환경오염을 일으키는 원인을 알아보면 암석 내 황화광물에 의한 산화 반응으로 볼 수 있다. 황화광물은 퇴적물의 속

성작용이나 광화작용 중 열수로부터 침전, 열수와 반응에 의한 변성작용 등 다양한 지질작용에 의해 생성된다. 대표적인 황화광물로는 황철석( $FeS_2$ )이 있으며, 이 황철석은 대기와 차단된 상태로 존재하면 안정한 상태를 유지하는데 토공 시 대기에 노출되면 산소와 물과 반응하여 황산과 금속 침전물을 생성시키는 산성배수를 발생시킨다(Kim, 2007).

현재까지 지반공학 분야에서는 위와 같은 제 3기 이암에서 발생하는 물리·화학적 특성으로 인한 역학적 문제뿐만 아니라 여러 복합적인 문제에 대한 연구가 미비하기 때문에 제 3기 이암의 활용에 제약으로 작용하고 있다. 따라서 본 연구를 통하여 제 3기 이암의 물리·공학적 특성을 명확하게 파악하고 역학적 관계와 환경적 원인의 규명이 필요하다. 아울러 이암의 특성을 보완하기 위하여 복합슬래그(제강슬래그 70%, 고로슬래그 30%)와 중화·코팅제 처리에 대해서도 연구가 필요하다.



Fig. 1.1 Damaged cut slope and structure by acid rock drainage

## 1.2 연구 내용

본 연구의 최종 목표는 포항지역에 분포하는 제 3기 이암을 성토재로 활용하기 위해서 복합슬래그(제강슬래그 70%, 고로슬래그 30%)와 중화·코팅제를 처리함으로써 성토 재료기준에 충족시키고 적용 및 활용 방법을 제시하기 위함이다.

논문은 총 5장으로 구성되어 있으며 서론 이외에 본 논문을 구성하고 있는 각 장에 대한 연구의 세부적인 내용은 다음과 같다.

제 2장은 본 연구를 진행에 앞서 기존 연구의 문헌을 고찰한 내용으로 제 3기 이암의 특성 및 분류방법과 개량재로 활용되는 복합슬래그(철강슬래그)와 중화·코팅제의 특성, 산성배수에 대하여 기술하였다.

제 3장은 연구 방법으로 사용되는 시료를 채취 및 선정하였으며, 이 시료에 대한 물리·화학적 특성을 파악하기 위해 기존 문헌을 참고하여 실내시험을 선정하여 국가표준(KS)에 기재되어 있는 시험과 산성배수 발생 개연성 평가 방법을 기술하였다. 추가로 구성 광물 및 성분 분석에 이용되는 시험기기의 사용 방법 및 진행 과정을 상세하게 나타내었다. 현장시험으로는 한국도로공사 고속도로 품질기준(2017)에 상응하는 시험 방법을 선정하여 내용을 기술하였다.

제 4장은 연구 결과 및 고찰으로써 시료의 물리·화학적 특성을 분석한 결과와 기존 문헌과의 비교를 통해 연구 결과에 대한 신뢰성을 검증하였으며, 결과를 토대로 하여 제 3기 이암을 도로 품질기준에 맞추기 위해 복합슬래그와 중화·코팅제 처리를 시행하였다. 또한 최적의 배합설계 비율을 산출하여 경제성을 고려하였으며, 제 3기 이암을 개량하여 시공된 성토구조체에 모니터링 계측시스템을 설치하여 안정성을 판단하기 위한 근거로 활용하였다.

제 5장은 결론으로 모든 시험에 대한 연구 결과를 종합적으로 정리하여 제 3기 이암의 공학적 특성을 명확하게 파악하였으며 활용할 수 있는 방안 및 향후의 연구 방향을 제시하였다.

## 제 2 장 기존 연구자료

### 2.1 이암의 특성

#### 2.1.1 이암의 물리적 특성

이암은 사암보다 더 작은 세립질로 구성되어 있는 암석을 말하며 퇴적암 중에서 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 이암의 구성성분은 대부분 60% 이상의 점토 광물로 이루어져 있으며, 점토 비율에 따라 실트암과 점토암으로 나뉜다. 이암의 점토성분은 Table 2.1과 같이 지층의 지질학적 시대에 따라 다르게 나타나며, 최근 지층일수록 팽윤성 점토가 많이 포함되어 있는 것을 알 수 있다 (Snethen et al., 1975). 신생대 제 3기 말에 형성된 이암은 팽창성이 큰 몬모릴로나이트에 포함된 스�멕타이트 계열의 점토로 이루어져 있는데, 이러한 이암은 매몰 깊이에 따라 속성작용에 의해 스�멕타이트에서 일라이트로 변환됨에 따라 구성비가 변화한다는 연구 결과가 있다.

**Table 2.1** Percentage of swelling clay in rocks by geological age  
(Lee et al., 2002)

Age	Percent (%)	Age	Percent (%)
Pliocene, Miocene	65	Upper Mississippian	40
Oligocene	50	Lower Mississippian	5
Eocene, Cretaceous	40	Devonian, Silurian	5
Jurassic, Triassic	20	Ordovician	15
Permian	40	Cambrian and Precambrian	5

이암은 파도나 난류와 같은 물의 흐름으로 인한 사층리(Cross-bedding), 입자 순으로 퇴적된 점이층리(Graded-bedding)가 나타나며 엽층(Lamina), 슬럼프구조(Slumping), 생물에 의한 굴착구조(Burrows), 깎고-메우기(Cut and Fill), 파쇄작용(Brecciation), 평행한 층리면에 따라 깨지는 박리작용(Fissility)과 같은 다양한 구조를 갖는다. 이러한 박리작용이 일어나는 이암을 세일이라고 칭한다. 점토는 이상적으로 층리에 평행하게 놓이지만, 대부분의 이암이 생성되는 해양환경 조건에서 퇴적되므로, 생물이 침전물을 파고들어 펠렛(Pellet)을 분비하여 퇴적된 조직에 혼합되는 생물교란이나 압밀이나 재결정을 통해 변성을 일으키는 속성작용의 영향을 많이 받아 형성된다. 이암의 색깔은 퇴적 환경에 의해 결정되는데, 어두운 계열의 암석일수록 더 많은 유기질 물질을 함유하고 있고, 붉거나 갈색, 노란색일 경우 Fe-결합물이 많이 함유되어 있는 것을 알 수 있다.

## 2.1.2 이암의 공학적 특성

### (1) 이암의 슬레이킹(Slaking)

자연 상태에서 오랜 기간에 걸쳐 고결화가 진행된 암석이라도 지하수위 변동, 지하굴착, 사면절토에 의한 응력해방과 흡수팽창, 풍화, 생물교란에 의해 암석의 고결력이 저하된다. 특히 포항지역에 고르게 분포되어 있는 신생대 제 3기 이암과 같이 점토성분을 많이 함유하고 있으며 충분한 고결화가 이루어지지 않은 암석에서는 여러 환경변화에 따라 반복적인 건습작용에 의하여 고결력과 전단강도가 급격하게 떨어져 본래의 조직이 파괴되고, 심한 경우에는 입자가 분리되는 세립화 현상을 보이는데 이를 슬레이킹이라 한다. 이암이 분포하는 지역에서 발생하는 비탈면 붕괴는 대부분 슬레이킹 현상에 기인된다고 볼 수 있다. Van Eeckhout(1976)는 습도변화가 이암의 팽창수축에 미치는 영향 연구를 통해 반복적인 건습작용에 의한 진행성으로 연장된 내부의 불연속면을 통하여 암반에 함수비가 증가하게 되고, 그 결과 비교적 작은 파괴 에너지만으로도 암반은 붕괴될 수 있다는 것을 발표하였다. 또한 Fig. 2.1과 같이 대부분의 이암은 비교적 가볍고 입도분포가 나쁘므로 공극이 많은데, 이러한 이암을 공기 중에 방치했을 때 높은 인장력으로 인하여 외측 간극부분에 공기가 유입된다.

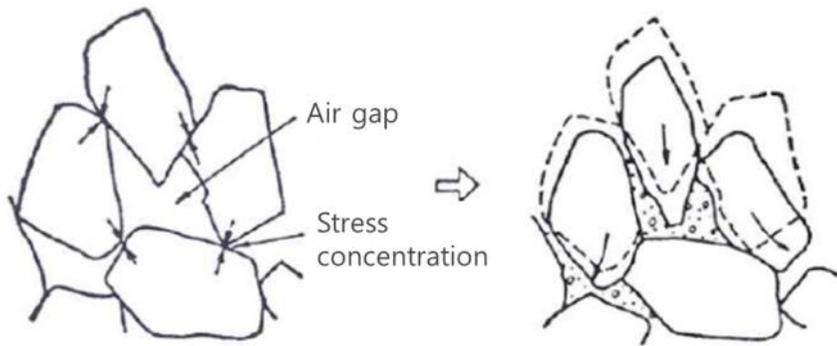


Fig. 2.1 General slaking process of mudstone(정강복, 2006)

이후에 암석의 간극이 포화되면 모관현상에 의하여 물이 이암 속으로 침투하기 때문에 갇혀있던 공기는 압력을 받게 된다. 이러한 슬레이킹 과정을 통하여 암석의 골격구조에 응력이 가해지는데, 이 과정에서 건습작용이 추가로 반복되면 내부의 불연속면이 연장되어 궁극적으로는 air breakage에 의하여 이암이 조그만 조각으로 부서지게 된다. 이암의 슬레이킹 현상은 함수에 의한 팽창변형을 또는 팽창압과 밀접한 관계를 맺고 있는데, 이는 암석의 광물성분 중 Na-몬모릴로나이트(스펙타이트)와 같은 팽창성 점토광물의 함량이 절대적으로 중요한 인자라고 볼 수 있다(Shaw, 1981; Taylor and Spears, 1981; Taylor, 1988).

이암이 분포하는 지역에서의 토공구간 중 자연비탈면에서 슬레이킹 발생이 빈번하게 일어나며, 절토 후의 법면에서도 사면파괴가 발생하고 있다. 이는 절토 후 2차적 변형에 의해 연약화되는 것으로 이암 절토면 파괴는 대부분 풍화가 쉽게 일어나는 표층에서 소규모 파괴가 발생한다. Fig. 2.2와 같은 지질구조에서는 대규모 사면파괴를 일으키는 경우가 있는데 첫 번째, Fig. 2.2의 (a)와 같은 경우에는 이암이 하부에 존재하며 투수성이 양호한 단층의 사력층을 깊게 절토하는 경우 사면붕괴를 일으키는 경우가 많다. 이는 이암과 사력층간의 균열로 수조가 형성되어 이암의 상부가 연약화되는 동시에 대량의 지하수가 집중되는 구조를 갖기 때문이다. 두 번째로 Fig. 2.2의 (b)와 같이 이암의 지층경사

방향과 법면 경사방향이 대개 같은 방향이고, 지층의 경사보다 법면 경사가 급한 지역에서 사면붕괴가 발생한다. 이러한 종류의 붕괴는 균열면의 경사보다 법면의 경사가 클수록, 절토고가 높을수록 붕괴규모는 커진다.

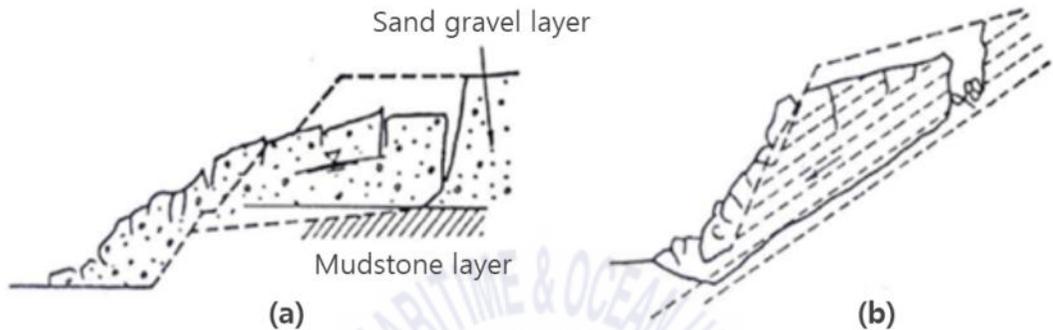


Fig. 2.2 Geologic structure expected to slope-collapses on a slope contained mudstone(정강복, 2006)

## (2) 이암의 팽윤(Swelling)

흙이나 연암이 수분을 흡수하면 전체 부피가 증가하는 현상으로 흡수팽창현상과 팽윤현상이 있다. Onodera(1974)는 암석의 흡수상태에 관하여 Fig. 2.3과 같은 모델을 사용하여 흡수팽창현상과 팽윤현상에 대하여 설명하고 있다. 흡수팽창은 실질 부분의 변화는 없고 유효간극이 물로 채워진 것에 의한 주로 물리적 부피 증가를 말한다. 따라서 암석의 조직이나 구조에 지배되며, 또한 불포화로 유효간극을 가지며 입자 간 결합력이 약한 암석에 나타나는 현상이다. 특히 굴착이나 사면 절토에 의한 응력 해방 시 흡수팽창의 발생이 쉽게 일어난다.

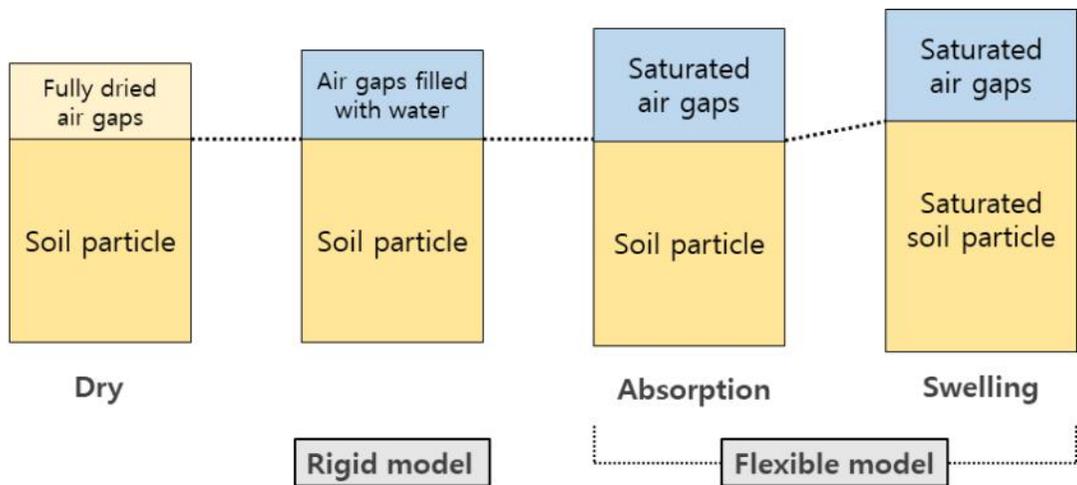


Fig. 2.3 Drying and absorption condition model of rock(Onodera, 1974)

한편 팽윤현상은 유효간극이 물로 채워져 팽창되어 있는 상태에서도 실질 부분에서 물을 흡수하여 계속해서 부피가 증가하는 현상이다. 이는 상온에서 물과 공존할 때 결정학적 성질이 변화하는 광물로 구성된 경우에 일어나는 현상으로, 특히 이암 내 점토광물인 몬모릴로나이트에서 점토입자 사이의 층에 물 분자가 흡착하여 부피가 현저하게 증가한다. 따라서 구속압 존재하는 경우에도 상당한 팽윤압을 발생하게 된다. Gillott(1968)는 이암이나 과압밀점토의 팽창은 점토입자의 격자구조와 물의 상호작용을 통하여 발생하는 매우 복잡한 과정이며, Fig. 2.4와 같이 팽창현상이 두 가지 발생 요인에 기인된다고 분석하였다. 첫 번째, 입자 또는 결정 간의 팽창은 모든 종류의 점토광물에 해당되며 건조상태의 이암이나 점성토의 잔류수가 모관압에 의해 물 입자들이 표면장력으로 결합해 있는데 강우나 지하수에 의해 수분을 흡수하게 되면 장력이 소실되고 점토가 팽창하게 된다. 두 번째, 결정구조 내 팽창은 대표적인 점토광물인 몬모릴로나이트의 특성으로 독립적인 단 1개의 몬모릴로나이트 구성층은 주로 교환성 양이온과 물이 약하게 결합되어 있다. 이 때 수분을 흡수하게 되면 1개의 독립적인 결정 사이뿐 아니라 결정을 구성층 전체에 물이 결합되어 팽창된다.



**Table 2.2** Weathering grades of weak and weathered rock (modified from Dearman, 1976; Geological Society, 1995).

Weathering Grade	General Description	Weathered Materials
Residual soil (VI)	The rock is completely changed to a soil in which the original rock texture has been completely destroyed.	Soil derived by in situ weathering but retaining none of the original texture or fabric.
Completely decomposed (V)	The rock is changed to soil in which the original rock texture is (mainly) preserved.	Considerably weakened, slakes, and the original texture is apparent.
Highly decomposed (IV)	50-100 percent soil from decomposition of the rock mass.	Large pieces can be broken by hand; does not readily slake when dry sample immersed in water.
Moderately decomposed (III)	Up to 50 percent soil from decomposition of the rock mass.	Considerably weakened, penetrative discoloring; large pieces cannot be broken by hand.
Slightly decomposed (II)	100 percent rock; discontinuity surfaces or rock material may be discolored.	Slight discoloration and slight weakening.
Fresh (I)	100 percent rock; no discoloration, decomposition, or other change.	Unchanged from original state.

Taylor and Spears(1981)는 지배적인 입자의 크기에 따라서 이암을 분류하고 있다. 그러나 이암은 실트와 점토 입자들을 많이 함유하고 있으며, 특히 점토광물이 지배적일 경우에는 적절한 분류법이 되지 못할 것이다. 한편 Morgenstern and Price(1974)는 이암과 점토를 구분하기 위해서 다음의 Fig. 2.5와 같은 분류

법을 제시하였다. 비배수전단강도( $c_{uo}$ )가 250 psi(18 kg/cm<sup>2</sup>)보다 크고 수분에 의해 열화하여 감소된 강도가 비배수전단강도의 60% 미만이며 수분변화가 1%를 초과할 경우 이암으로 분류하고, 이와 반대로 비배수전단강도가 250 psi보다 작고 강도손실이 60%를 초과할 경우에는 점토로 분류하였다.

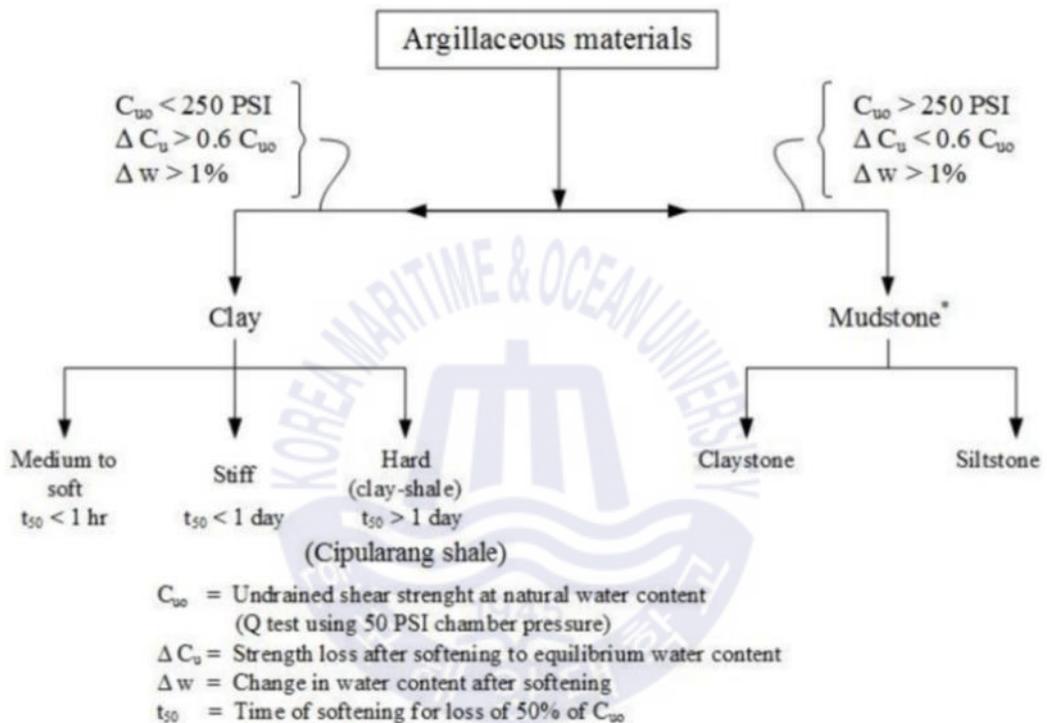


Fig. 2.5 Two parts of classification scheme based on minimum 50% clay sized particles(Morgenstern and Price, 1974)

Godfrey(1980)는 공학적 관점에서 통해 슬레이킹에 대하여 Table 2.3과 같이 분류하는 방법을 제시하였다. 이 분류방법은 호주표준협회의 AS1289-2000에 기술되어 있으며 주로 현장에서 암석의 슬레이킹 등급을 유용하게 분류할 수 있는 장점이 있다. Godfrey의 슬레이킹 분류는 우선 5 ~ 20mm의 작은 암석 덩어리를 증류수에 넣어 5분 동안 반응을 관찰함으로써 분류할 수 있게 된다.

**Table 2.3** Godfrey' s slaking grade

Code	Classification	Observations
G0	No slaking	No visible action. Water remains clear.
G1	Edge fall off only	Water remains clear. No further action after initial spall-off around knock points and edges.
G2	Slow surface slaking	Water remains clear. Slight to mild surface and edge slake-off within 3min. Surface appears slightly softened and swollen sometimes. No further action.
G3	Medium slaking; no colloid	Spall-off and slake to a fissile flake pile, tabular and sheet-like. Little or no visible swelling. No colloidal cloud. Core of original specimen often preserved as a series of upstanding flakes.
G4	Rapid slaking; no colloid	Immediate slake-down to a shapeless pile of smallish flakes with some swelling and moderate flocculation to some areas. No colloidal cloud.
G5	Rapid slaking; some colloid	Fast slake-down to a shapeless pile of small crusts and flakes. Often gel-like, colloidal, puffy flocculations. Thin, weak colloidal cloud. Moderate effervescence.
G6	Rapid slaking; swelling, thick colloid	Rapid and violent slake-down and swelling with much effervescence. Marked swelling and gel-like flocculations with quite a thick colloidal cloud.
G7	Extremely rapid slaking; gelled, thick colloid	Extremely rapid and often violent break-up to a swollen amorphous pile of jelly-like consistency with rapid colloidal cloud spread

## 2.2 철강슬래그의 특성

### 2.2.1 철강슬래그의 물리적 특성

철강슬래그는 제철소 고로에서 선철을 생산하는 과정에서 발생하는 산업부산물을 의미하며, 주원료(철광석)와 코크스, 석회석과 같은 부원료에 존재하는  $SiO_2$ 와  $Al_2O_3$  등이 고온에서 석회와 물리·화학적 혼합반응에 의해 형성된다. 철강슬래그는 Fig. 2.6과 같이 발생하는 공정에 따라 고로슬래그와 제강슬래그로 크게 분류되며 세부적으로 Fig. 2.7과 같이 분류할 수 있다. 철강슬래그는 분류된 산업부산물 전체를 뜻하므로, 각각 분류된 슬래그에 대한 물리적 특성을 종합적으로 살펴볼 필요가 있다.

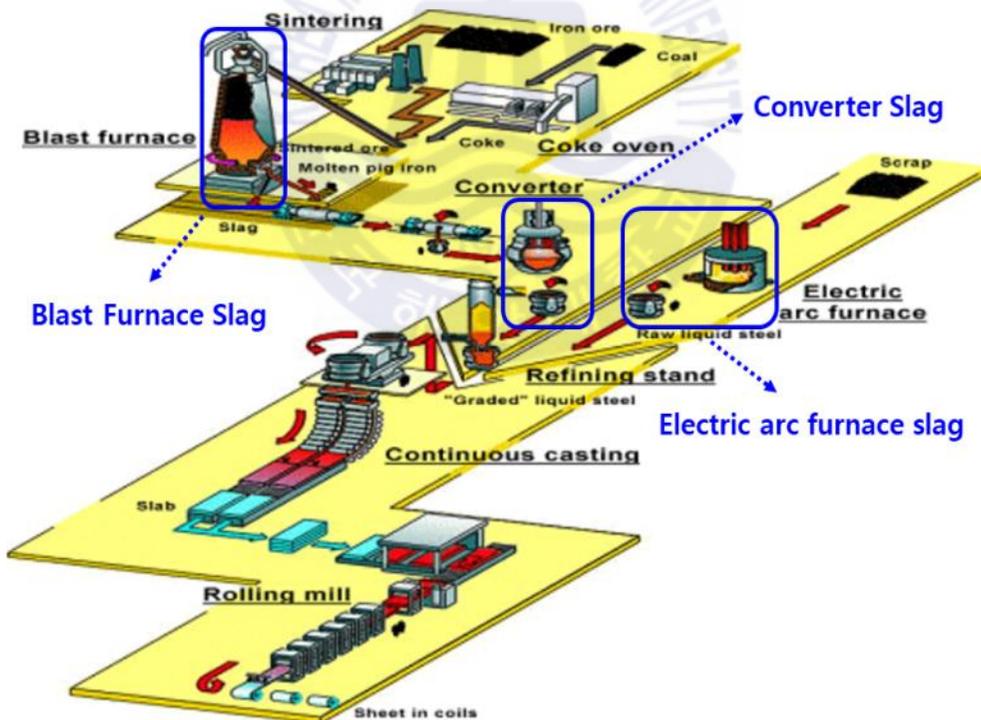


Fig. 2.6 Generation of slag in the steel process(Kim et al., 2012)

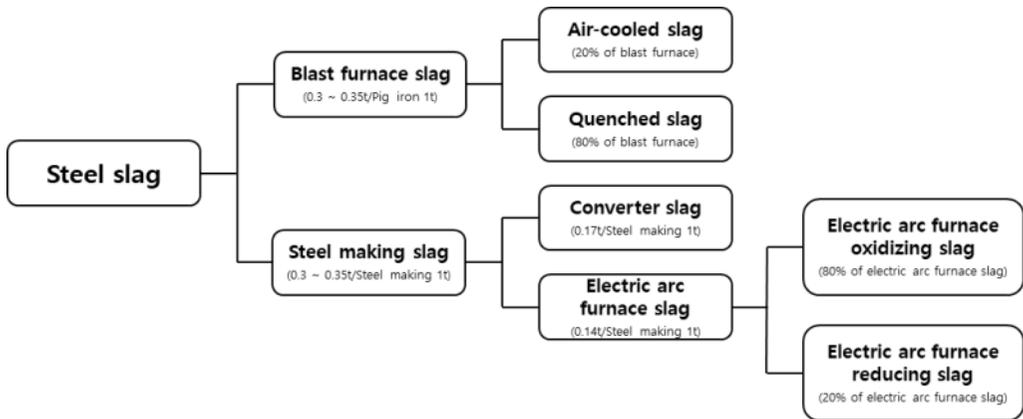


Fig. 2.7 Classification of steel slag

### (1) 고로슬래그

고로슬래그는 Melilite( $Ca_2MgSi_2O_7 - CaAl_2SiO_7$ )나 Merwinite( $CaMgSi_2O_8$ )와 유사한 광물학적 특징을 가지고 있으며, 냉각방식에 따라 서냉슬래그와 수쇄슬래그로 세분류된다. 서냉슬래그는 괴재슬래그라고도 불리기도 하며, 고로에서 용융되어 배출된 슬래그가 dry pit에서 공랭이나 적당한 살수를 통해 서서히 냉각시켜 결정구조가 형성된 입도가 비교적 암석형태의 슬래그를 뜻하며, 수쇄슬래그는 용융상태의 슬래그를 고압의 물을 대량 분사하거나 수중에 투입하여 급격하게 냉각시켜 결정질이 거의 형성되지 않는 입도가 유리질의 모래와 같은 슬래그를 말한다. 서냉슬래그는 물과 접촉하면 석회나 실리카 성분이 용출되어 슬래그 표면에 치밀한 수화생성물을 형성하고 알칼리 환경에서 산화알루미늄이 포함된 수화물을 형성해 슬래그의 입자를 연결하는 결합체가 되어 응결 경화를 일으키는 성질을 가지게 된다. 이러한 수경성으로 이용하여 노반재에 서냉슬래그 사용 시 장기간에 걸쳐 노반 지지력을 향상시키는 효과를 볼 수 있다. 또한 서냉슬래그는 비교적 실리카 함량이 적어 콘크리트용 골재로 사용하더라도 알칼리 골재반응에 대한 문제 없이 안전하게 사용 가능하다. 수쇄슬래그의 특징으로는 잠재수경성을 꼽을 수 있으며, 미분하여 포틀랜드 시멘트의 혼합재 또

는 콘크리트 혼화재로 유용하게 사용되고 있다. 미분된 수재슬래그는 콘크리트 혼화재로 이용 시 장기강도의 증대, 수화열 저감, 내화학적 등의 장점이 있다. 또한 수재슬래그는 모래질로 입자 간의 내부마찰각이 커 전단저항이 크고 알칼리 자극에 의해 고화되는 성질이 있기 때문에 연약지반 안정화를 위한 고화재, 지반개량재, 매립재, 성·복토재, 배수재 등으로 활용되고 있다. 수재슬래그는 함수비에 예민하지 않고 유해불순물이 없는 양질의 재료로 콘크리트용 잔골재로도 사용되고 있다. 고로슬래그는 규산 성분 이외에도 철이나 붕소 등의 미네랄을 함유하고 있어 농업용 비료로 사용되며, 포틀랜드 시멘트와 같은 클링커 원료로 점토를 대체하여 이용되기도 하므로 다양한 분야에 활용성이 높게 재 활용되고 있다.

## (2) 제강슬래그

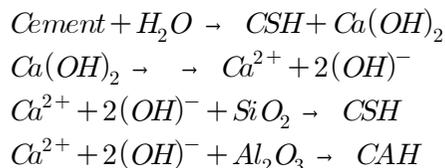
제강슬래그는 Belite( $Ca_2SiO_4$ ), Calcium Ferrite( $Ca_2Fe_2O_5$ ) 등으로 이루어져 있으며, 공정에 따라 전로슬래그와 전기로슬래그로 세분류할 수 있다. 전로슬래그는 주원료인 용융선철에 포함된 순 탄소를 99.5% 이상 제거하기 위해 부원료 생석회( $CaO$ ), 석회석( $CaCO_3$ ), 돌로마이트( $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ ) 등을 전로에 투입하고 고압으로 산소를 주입하여 격렬한 산화 반응에 의해 선철에 함유되어 있는 규소, 인, 탄소를 산화시킨 후, 순철과의 비중 차에 의해 분리되어 남은 산화된 불순물이 생석회와의 결합에 의해 생성된 슬래그를 말한다. 전로슬래그가 일반적인 천연 채석보다 무겁고 경질한 이유는 정련하는 과정에서  $Fe$ 의 일부가 산화되어 슬래그에 화학적 결합이 되었기 때문이다. 전기로슬래그는 외부로부터 열을 공급받아 원료를 용해하여 정련하는 과정에서 전기로 내부 환경에 따라 산화·환원슬래그로 구분된다. 산화슬래그는 스크랩을 주로 사용하는 것으로 주원료를 아크열을 열원으로 이용해 용융하며, 이 과정에 산소를 투입하여 불필요한 성분을 산화시켜 생석회와의 결합반응에 의한 산화슬래그가 생성된다. 환원슬래그는 산화슬래그의 배출 후, 용강 중에 생석회 등을 투입하여 산화물 등의 불순물과 결합시키는 방법의 강의 탈산과 성분조정과 같은 환원 정련공정

에 의해 생성된다. 전로슬래그는 미반응한 유리석회(Free-CaO)의 함량이 비교적 많이 포함되어 있어 물과 반응하여 알칼리 화합물  $Ca(OH)_2$ 를 생성한다. 이러한 경우에 팽창반응이 일어나므로 콘크리트의 골재로 사용 시 팽창균열의 위험을 고려해야 한다. 이러한 전로슬래그의 팽창반응을 방지하기 위해서는 야적장에 일정 기간 방치하거나 증기를 통한 촉진 숙성과정을 거쳐야 한다. 하지만 이러한 공정은 방치 시간이나 야적장 확보, 침출수와 비산먼지와 같은 환경문제의 어려움을 갖고 있다(KWASTE, 2011). 전기로 산화슬래그는 밀도가 높아 기공이 적고 견고하며 치밀한 정방형 결정을 갖고 있어 마모 저항성이 높고, 팽창위험이 낮으며, 아스팔트와의 친화성이 매우 높은 것이 특징이다.

## 2.2.2 철강슬래그의 공학적 특성

### (1) 포졸란 반응의 메커니즘

철강슬래그의 잠재수경성을 쉽게 이해하기 위해 수경성을 갖는 포졸란 반응을 살펴볼 필요가 있다. 포졸란은 물질이 단독적인 수경성은 없으나 물에 용해되어 있는  $Ca(OH)_2$ 와 반응하여 불용성 경화체가 생성되는 성질을 갖는 물질을 총칭한다. 포졸란 반응에 대해 구체적으로 살펴보면 포졸란 물질에서 용출된  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ 와 같은 성분이 시멘트 구성 화합물인  $C_3S$ ,  $C_2S$  등이 수화할 때 생성된  $Ca(OH)_2$ 와 서서히 반응하여 치밀한 조직인 칼슘 실리케이트 수화물( $3CaO-2SiO_2-3H_2O$  계)이나 칼슘 알루미늄네이트 수화물( $3CaO-Al_2O_3-6H_2O$  계)을 형성하게 된다. Moh(1965)는 다음은 시멘트의 수화반응과 흡과 수산화칼슘의 포졸란 반응에 대해 설명하고 있다.



Chadda(1970)도 흡과 시멘트의 수화반응에 의해 가변성을 띠는  $Ca^{2+}$ 이온이

증가하게 되어  $K^+, Na^+$  이온과 완전히 대체됨에 따라  $Ca^{2+}$  이온이 음전하를 띠는 흙 입자의 표면으로 흡착되어 응집력이 증가한다고 하였다. 또한 시멘트 함량이 증가할수록 시멘트 입자의 수화작용에 의해서 흙덩어리 사이의 간극을 채워 역학적으로 큰 강도와 불투수성인 시멘트 경화체가 된다고 주장하였다. 이러한 포졸란 반응 물질은 화산재, 응회암, 규조토와 같은 천연 포졸란과 플라이애쉬, 실리카 흙과 같은 인공 포졸란이 있다. 포졸란 물질은 내구성과 내해수성, 내화학성이 우수하게 개선되는 장점으로 콘크리트 혼화재로 주로 사용된다.

## (2) 철강슬래그의 잠재수경성

철강슬래그의 잠재수경성 특성은 대부분 혼합되어 있는 고로슬래그에 의해 발현된다. 고로슬래그는  $SiO_2$  유리구조를 바탕으로  $Al_2O_3$ 가 다량 존재하면서 염기인  $CaO, MgO$ 가 주된 성분으로 이루어져 있다. 따라서 고로슬래그 유리질은 칼슘 알루미늄노실리케이트 유리(Calcium-aluminosilicate glass)로 분류되며 강한 잠재수경성 특성을 갖고 있다(Lee et al., 2012). 포틀랜드 시멘트의 수경성은 클링커 광물과 물 분자와 접촉하면서 용출을 일으켜 수화물을 형성하고 경화 반응이 일어나는 포졸란 반응을 말한다. 하지만 고로슬래그의 잠재수경성은 물 분자와 접촉만으로는 성분이 용출되지 않는데 알칼리 자극제가 첨가할 경우에는 수경성 반응이 활성화되는 특성이 있다.

칼슘 알루미늄노실리케이트 유리의 수화반응과 유사한 고로슬래그의 잠재수경성의 구체적인 반응과정은 Fig. 2.8과 같다. 고로슬래그와 물 분자가 접촉하여  $Ca^{2+}, Al^{3+}, Mg^{2+}$  이온이 용출되면서 표면에  $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 6H_2O$  ( $ASH_6$ )의 조성을 갖는 약  $0.2\mu m$  두께의 불투수성 산화피막이 형성된다. 이로 인해 고로슬래그와 물 분자 간의 반응이 차단되어 액상의 농도와 pH가 낮아지게 되고, 결국에는 수화반응이 더 이상 일어나지 않게 된다(Kondo and Ueda, 1968). 하지만 pH 12 이상의 알칼리 자극제를 첨가하게 되면  $OH^-$  이온이 고로슬래그의 표면에 흡착하여 산화피막을 파괴시키고 이온을 재용출시킬 수 있다. 따라서 고로슬래그의 수화반응에서는 알칼리 자극제가 필수적이지만, 반응이 일어날 수 있

는 소량만 존재한다면 이 후에는 고로슬래그 자체에서  $CaO$ 와  $SiO_2$ 성분이 용출되면서 수화반응에 필요량이 공급되기 때문에 지속적으로 반응이 활성화되므로 결국에는 용출된 이온들이 C-S-H( $CaO-SiO_2-H_2O$ )계 수화물을 형성하는 경화반응이 진행된다. 고로슬래그의 잠재수경성으로 인한 수화반응은 일반적인 포틀랜드 시멘트의 수화반응에 비해 진행속도가 느리기 때문에 혼화된 콘크리트의 초기강도가 낮은 단점이 있다. 하지만 장기간에 걸친 지속적으로 경화반응으로 6개월 이상의 장기강도는 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우보다 우수한 결과를 나타낸다고 한다. C-S-H계 수화물의 특징으로는 포틀랜드 시멘트보다  $MgO$ 와  $Al_2O_3$ 의 함량이 높으며, 치밀하지만 침상 결정으로 구성되어 있어 슬래그 함량이 많을수록 짧고 얇아져 결정성이 좋지 않다. 또한 슬래그 함량이 많을수록 초기 세공용적은 크지만, 수화반응으로 인해 세공용적이 감소하게 된다. 고로슬래그의 잠재수경성은 화학조성, 분말도, 양생, 유리화율, 첨가되는 알칼리 자극제의 종류와 같은 복합적인 조건에 따라 강도 발현의 정도가 다르게 나타난다.

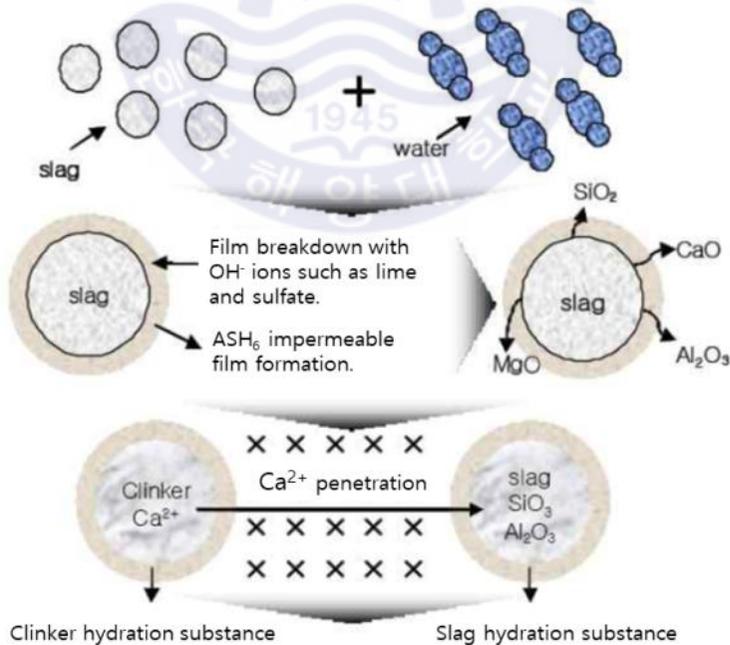


Fig. 2.8 Hydration reaction of blast furnace slag(Shin et al., 2012)

### (3) 철강슬래그의 알칼리 자극제

앞서 언급했듯이 철강슬래그의 잠재수경성 발현을 위한 알칼리 자극제 첨가는 필수적인 요소이다. Fig. 2.9는 고로슬래그와 유사한 구조인 칼슘 알루미노실리케이트 유리가 알칼리 자극제의 pH 조건에 따라 수화하는 과정을 나타내고 있다. (A)와 같이 pH 7~10 조건에서는 유리질 내부의  $Na^+, Ca^{2+}$  이온이 물 분자의  $H^+$  이온과 미량으로 이온교환 반응이 일어난다. (B)의 pH 11~12 초기 조건에서는 물 분자에 의한 가수분해 반응으로 유리질 표면에 있는  $Si-O-Al$  결합의  $Si$ 와  $Al$ 에  $OH$ 기가 흡착하여 표면에서 수화된다. pH 11~12 조건이 지속되면 (C)와 같이  $Si-O-Al$  결합이 끊어지게 된다. (D)와 같이 결합이 끊어지게 되면 결합에 구성되어 있던  $Si^{4+}, Al^{3+}$  이온과 내부에 갇혀있던  $Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+$  이온 등이 용출하게 된다. 용출된  $Si^{4+}, Al^{3+}$  이온은  $OH^-$  이온과 결합하여  $Si(OH)_3O^-$ ,  $Al(OH)_4^-$  음이온을 형성하고,  $Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+$  이온은 그대로 존재하게 된다. 이후 일정 포화 농도가 되면 양이온과 음이온이 결합하여 C-S-H나 C-A-H계 수화물을 형성하면서 경화하게 된다. 따라서 철강슬래그의 잠재수경성 반응을 위한 알칼리 자극제 적정 농도는 pH 12 전후로 볼 수 있다.

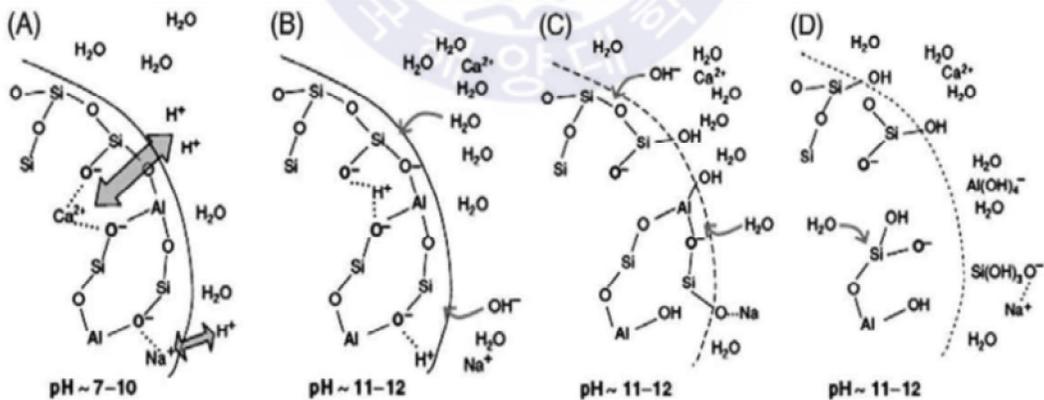


Fig. 2.9 Dissolution mechanism of an aluminosilicate glass during the early stage of reaction(Li et al., 2010)

철강슬래그의 잠재수경성을 활성화시켜 주는 자극제의 종류에는 수산화 알칼리, 염화물, 황산염, 에트링가이트(ettringite)계 자극제가 있다. 수산화 알칼리 자극제의 반응 정도를 비교해보면  $Na(OH)$ ,  $KOH$ ,  $Li(OH)$ ,  $Ca(OH)_2$ 의 높은 반응 순으로 나타낼 수 있다.  $Ca(OH)_2$ 는 수화반응이 진행될 수 있는 유도기를 가지고 있지만,  $Na(OH)$ 과 이외의 수산화물 자극제는 유도기가 없어 반응이 빠르게 진행되고, 반응생성물에 관여하지 않는 촉매작용으로만 활용되는 차이점을 갖고 있다. 염화물 자극제로는  $KCl$ ,  $NaCl$ 이 있으며, 장기간 작용하여 수화반응을 촉진하지만 철강슬래그의 수화반응에 영향을 미치지 않는다. 황산염 자극제인 무수석고( $CaSO_4$ )는 강도 발현성이 우수하며, 높은 자극효과가 나타나는 데 반면에, 이수석고의 경우에는 장기 강도 발현율이 나쁘다는 분석 결과가 알려져 있다. 에트링가이트계 자극제는 수화 반응에 의해 생성되는 에트링가이트 자신과 수산화칼슘을 자극하여 고강도, 급경성의 효과를 얻을 수 있는 장점을 갖고 있다(Lee et al., 2012).

Lee et al.(2001)은 고로슬래그를 전량 사용한 경화체의 초기강도는 pH 12.8 이상의 자극제 수용액에서 효과적인 강도발현이 진행되었으며, pH가 높을수록 고로슬래그의 잠재수경성 발현이 빨라졌는데 단열온도 상승량도 동일한 경향으로 나타났다고 발표하였다. 자극제의 종류에 따른 영향을 비교해보면,  $NaOH$ 은 pH가 가장 높고 빠른 수화열로 잠재수경성 발현에 효과적이지만 주사현미경(SEM)으로 살펴보면  $Na^+$ 이온이 포함된 자극제 사용은 시멘트 성분 중  $C_3A$ 와의 반응에서 모세관 공극경이 크게 발생하여 강도를 저하되는 것을 확인하였다. 하지만  $Ca(OH)_2$ 은 사용 초기 재령부터 겔과 침상형태의 에트링가이트의 활발한 생성으로 내부 공극이 충전되어 강도증진이 지속해서 일어나며, 특히 5%  $Ca(OH)_2$  수용액의 경우가 압축강도 가장 효과적으로 증대되는 결과가 확인되었다.

## 2.3 중화·코팅제의 특성

### 2.3.1 중화·코팅제 처리 필요성

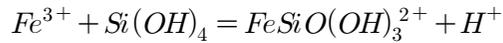
국내·외에서의 산성배수 관련 연구는 주로 폐광산 주변의 광미에서 발생하는 산성광산배수(AMD)에 대한 많은 연구가 이루어지고 있었다. 하지만 최근 사회기반시설의 확충 사업과 건설 현장의 기술 향상으로 산지에 대한 지반굴착, 사면절토로 산성암반배수(ARD)의 문제가 빈번하게 발생되고 있어 현장에 적용 가능한 연구가 필요하다. 건설 현장에서는 산성배수 발생을 억제하기 위해 절취사면에 숏크리트 공법을 시공하고 있지만, 이 공법은 배수가 발생될 뿐 아니라 균열이 진행된 사면에서 콘크리트와 암반이 완벽한 밀착이 어렵기 때문에 미세공간이 발생하여 산성배수가 지속되는 실정이다. 따라서 이 문제를 더 정확하고 현실적으로 해결하기 위한 해결방법으로 산화제와 황철석( $FeS_2$ )의 접촉을 차단하는 방법으로 피막 형성이나 격리를 통하여 황화광물에 물과 산소의 접촉을 차단시키는 물리적 방법과  $NaOH$ ,  $Ca(OH)_2$ ,  $CaCO_3$  등을 이용하여 산성배수를 중화시키는 동시에 중금속 침전을 유도하는 화학적 방법이 있다.

표준 황철석 산화 실험에서의 연구 결과에 의하면, 산화 과정에서 황철석 표면에서 2가 또는 3가  $Fe$  이온이 먼저 용출되고  $SO_4^{2-}$  이온이 용액으로 용출되는 것으로 밝혀졌다. 이 과정에서 철은 인산염과 반응하여 비비아나이트(vivianite), 스트렝자이드(strengite)와 같은 안정된 철인산염 광물로 쉽게 침전 및 도포된다. 하지만 결정학적인 관점에서 신선한 황철석의 표면에 철이 노출된 면적은 약 1/3 정도로 추정되어 전체적인 표면 코팅효과를 보기는 어렵다고 판단된다.

### 2.3.2 중화·코팅제 처리 기술

Evangelou(1995)는 장기적인 황철석 산화 반응을 억제하기 위해서 황철석 표면에 피막처리를 통해 산소의 접촉을 방지하는 방법이 제안하였으며, Zhang and Evangeolu(1998)는 황철석 표면에 규산염 피막을 형성시켜 산성배수 발생

을 억제하는 연구를 진행하였다. 이론적으로 철규산염이 생성되는 과정은 다음과 같다.



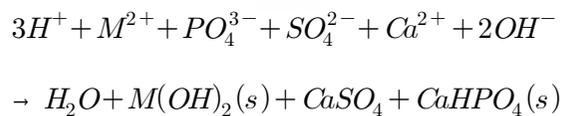
철규산염이 형성되는 이론적인 배경은 철인산염 피막 형성 기술과 같다. 즉, 산화제를 포함하는 인산염 또는 규산염 용액은 광미나 산성배수가 발생하는 암석에 반응시켜 황철석이 산화되어 용출하는  $Fe^{3+}$ 와 이온 결합하여 황철석 표면에 피막이 형성되는 것이다. 이러한 과정을 거쳐 생성된 철인산염 또는 철규산염은 중성 pH 조건에서 물에 대하여 상대적으로 안정한 상태의 물질로 존재한다(Evangelou, 2001).

Nyavor and Egiebor(1995)는 금속 부식방지에 활용되는 표면처리기술 중 인산처리기술을 응용하여 광미에 적용하여 산성배수 발생을 저감하는 연구를 진행하였다. 이 연구는 황철석 표면의 산화 과정에서 용출되는 철을 인산과 반응시켜 황철석 표면에 철인산염 피막이 도포되는 반응이다. 황철석 표면에 형성된 철인산염 화합물은 황철석과 용존산소의 산화 반응을 물리적으로 차단하는 역할을 하기 때문에 산성배수 발생이 효과적으로 억제된다.

KIGAM(2007)에서는 최적 피막 형성 조건을 도출하기 위해서 다양한 조건에 대한 연구를 진행하였다. 산성배수 발생 암석에  $KH_2PO_4$  코팅제와 30%  $H_2O_2$  산화제,  $NaOAc$  pH 조절제를 사용하였으며, 조건은 화학약품의 농도, 용액의 pH, 온도의 변화를 주어 반응 후의 용액의 pH와  $H^+$ , Fe,  $SO_4^{2-}$ 의 함량을 측정하였다. 반응 후의 Fe,  $SO_4^{2-}$  농도가 낮을수록 피막의 형성 조건이 높다고 판단하였고, pH 6 ( $NaOAc$ )에서 0.01M  $PO_4^{3-}$ , 0.01M  $H_2O_2$  조건이 무처리 조건보다  $SO_4^{2-}$  발생량이 81%로 가장 많이 저감되어 피막을 형성하는 과정에서 최적의 연구 결과로 나타났다. 최적 조건에서 형성된 피막의 안정을 시험한 결과 pH 3 - 10 조건에서는 96% 이상의 피막이 손상되지 않았으며, 상온 조건과 비교하여 4 - 70°C에서 시험한 결과 온도에 의한 영향은 없었다.

지민규 등(2010)은 코팅제 및 산화제 종류에 따른 표면 피막형성 및  $SO_4^{2-}$  제거 영향에 대한 연구를 진행하였다. 0.01M  $NaClO$  산화제와 0.01M  $NaOAc$  pH 조절제를 시험 조건으로 0.01M 농도의  $KH_2PO_4$ ,  $MgO$ ,  $KMnO_4$  코팅제에 대한  $SO_4^{2-}$  제거 영향을 시험한 결과, 대체적으로  $KH_2PO_4$  코팅제가 최대 92%의 제거율을 보였으며 시료 채취장소에 따라서  $KMnO_4$  코팅제가 제거율이 높은 결과를 보였다. 이는 시료 내 주요 구성 물질과 화학적 특성에 영향을 받는 것으로 판단되며,  $Fe(II)$ ,  $Mn(II)$ 가 complex를 이루어 침전되는 것을 보고한 연구가 있다(Bottcher 1998). 다음으로 산화제 종류에 따른  $SO_4^{2-}$  제거율을 알아보기 위해 앞선 실험에서의 동일한 조건에서 0.01M  $NaClO$ ,  $H_2O_2$  산화제로 시험한 결과  $NaClO$  산화제 조건이  $H_2O_2$  산화제 조건보다 높은  $SO_4^{2-}$  제거율을 나타내었다. 이는 산화력이  $NaClO$ 가 더 좋아서 황철석 표면을 빠르게 산화시키고 철을 용출시키고 황철석 표면에 피막을 형성시키는 결과로 해석할 수 있다.

중화·코팅제 처리를 통한 pH 중화 및 황철석 피막 형성은 산성배수 발생을 억제하는 효과가 있지만, 반응 과정에서 유출되는 황산과 중금속뿐 아니라 반응에 참여하지 못한 중화·코팅제가 주변 환경을 오염시키는 2차 환경오염의 우려가 있다. 따라서 KIGAM(2007)은 2차 환경오염에 적합한 물질로  $Ca(OH)_2$ 를 선정하였다.



위 반응식과 같이  $Ca(OH)_2$ 에 의한 황산의 중화 및 중금속,  $PO_4^{3-}$  제거가 가능하며, 반응 물질인  $CaHPO_4$ 는 오염된 수질과 토양 정화에 쓰이는 소재이기 때문에 더욱 적합하다. 산성배수가 발생시킨 유출수에 0.01M  $Ca(OH)_2$ 를 여액의 50% 정도 첨가한 결과, pH가 높아지며 중금속 농도가 감소되고  $PO_4^{3-}$  농도를 약 45%가 감소한 것을 확인하였다.

## 2.4 산성 배수

### 2.4.1 산성배수 발생 메커니즘

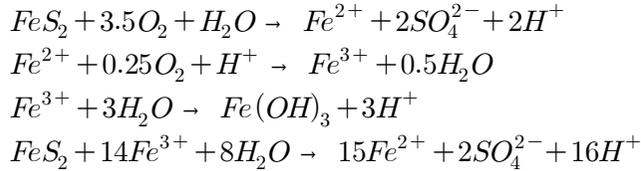
산성배수를 발생시키는 황화광물(Sulfides)은 암석과 퇴적물에 흔하게 존재하는데 퇴적물의 속성작용, 광화작용 중 열수에 의한 침전, 열수와 암석과의 반응으로 인한 변성작용 등 다양한 지질작용에 의해 생성된다. 유재영(1995)은 황화광물의 화학 조성은 생성되는 조건에 따라 다르며, 주요 성분은 황과 결합된 금속 원소들로 구성되어 있다고 제시하였다(Table 2.4).

**Table 2.4** Chemical composition of representative sulfide minerals

Type	Mineral name	Chemical composition	Metal oxidation number	Sulfur oxidation number
$A_2X$	Argentite	$Ag_2S$	+1	-2
	Chalcocite	$Cu_2S$		
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	$MoS_2$		

황화물은 주로 황 원소가 -1, -2가, 금속원소는 +1, +2를 가지며, 지하에서 대기와 차단된 상태로 존재하고 온도와 압력 등의 변화가 없으면 안정된 상태로 유지된다. 하지만 광업 활동이나 토목공사의 일환인 지반굴착, 사면절토, 터널 천공으로 지표에 노출되고 수분에 함유되어 있는 용존산소나, 대기 중 산소와 접촉하게 되면 산화 과정에서 황산을 생성하고 산성배수를 발생시킨다.

산성배수를 발생시키는 가장 대표적인 황화광물은  $FeS_2$ 로 동질이상인 백철석 (Marcasite)과 황철석(Pyrite)의 형태로 산출된다. 백철석은 황철석보다 안정하지 않아 쉽게 분해되는데, 자연계에서는 황철석이 더 많이 존재하며, 산성배수의 발생은 대부분 황철석에 의해서 야기되며 황철석의 산화 과정은 다음과 같다 (Stum and Morgan, 1995).



산성배수의 발생은 황철석 표면이 산소와 물에 노출되어 주변 pH에서 산화 반응이 일어나며  $Fe^{2+}, H^+, SO_4^{2-}$ 를 생성한다. pH > 4의 산화 환경에서는  $Fe^{2+}$ 가  $Fe(OH)_3$ 로 침전되면서 철이 제거되는데, 산화 반응이 계속 진행됨에 따라  $H^+$ 가 생성되어 pH가 점차 낮아지게 된다. pH 4 미만으로 감소할 때,  $Fe$  산화 박테리아는 대부분 pH 2-4 값에 적응되어  $Fe^{2+}$ 에서  $Fe^{3+}$ 로 산화 과정을 실질적으로 증가시킨다. 결국 pH < 4의 산화 환경에 도달하면  $Fe^{3+}$ 의 용해도가 증가하고  $Fe^{3+}$ 가 영구적인 산화제로 산소가 산화제 역할을 대신하여 황철석의 산화 반응이 종료될 때까지 더 많은  $H^+$ 과  $Fe^{2+}$ 를 생성하게 된다.

위와 같이 황철석의 산화 반응은 미생물 작용과 순수 무기적인 반응의 복합 과정이다. 황철석의 산화에 관여하는 미생물을 살펴보면 Thiobacillus ferrooxidans, Thiobacillus thiooxidans, Thiobacillus novellus, Thiobacillus acidophilus, Sulfurlobus acidocaldarius, Leptospirillum ferrooxidans 등이 있다. 미생물 작용에 의한  $Fe^{3+}$ 의 생성은 산소에 의한 생성보다 약  $10^6$ 배 이상으로 알려져 있다(Kirby et al., 1999; Kock and Schippers, 2006; Nordstrom, 1982).

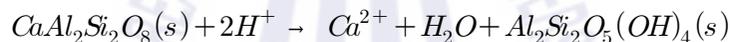
일반적으로 산성배수 발생의 주원인 광물인 황철석 자체에 *As, Cd, Cu, Zn* 등과 같은 중금속을 미량 원소로 함유하고 있다. 발생된 산성배수는 많은 수소 이온을 함유하고 있어 주변 환경에 존재하는 조암광물 또한 용해시켜 광물 내에 존재하는 중금속들의 용해도를 증가시킨다. 따라서 산성배수는 고농도의

$Fe$ ,  $H$ ,  $SO_4$  이외에도 많은 중금속이 포함되어 있는 특징을 갖는다. 다음은 규산염 광물의 용해되는 과정을 나타낸 반응식이다.



위 반응식과 같이 낮은 pH 상태의 산성배수가 하천 및 지하수에 유입하게 되면 pH가 급격히 높아져 철수산화물이나 알루미늄수산화물 형태로 침전하게 되어 Yellow boy 또는 백화 현상을 유발시킨다. 이러한 산성배수는 토양이나 지표수, 지하수를 오염시켜 질병유발, 주변 생태계 교란 및 다양한 환경문제를 유발하는 것으로 알려져 있다(Kalin et al., 2006; Koryak et al., 1972).

암석이나 콘크리트 구조물에 낮은 pH의 산성배수에 노출되면 암석에 풍화를 촉진시키고 암석 자체의 구성 광물로 산성배수를 중화시켜 용해를 가속화시킨다(Kim, 2007).



특히 암석 틈에 생성된 황산염 광물은 쪼개로 작용하여 물리적 풍화를 촉진시키며, 절리가 발달된 사면에서도 절리면을 따라 산성배수가 침투하여 물리적 화학적 풍화를 촉진하여 절리면을 따라 암괴의 붕괴를 촉진한다. 그리고 콘크리트와 아스콘에 사용되는 골재 품질평가에서 황화광물의 함유량과 산성배수 발생 개연성에 대한 평가가 이루어지지 않고 있어 적절한 평가 없이 사용되는 골재에 의한 많은 피해 사례가 있다(Floyd et al., 2003; Lee et al., 2005; Tagnit- Hamou et al., 2005). 위와 같이 골재 품질평가가 이루어지지 않은 채 콘크리트의 골재로 사용된 황철석은 용존산소를 함유한 물과 반응하여 산화되면서 산성배수를 발생시키고 산화철, 수산화철, 에트링가이트(ettringite) 등의 2차 광물을 생성한다. 2차 광물의 생성은 내부 부피 증가의 원인으로 균열이 발생하여 강도 저하로 이어지며, 콘크리트와 골재와의 탈착을 촉진시켜 콘크리트의 노후화가 촉진된다.

산성배수의 발생은 주변 생태계를 교란시키거나 식생 고사 및 생육에도 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 산성배수의 영향을 받은 오염토나 산성배수

를 발생시키는 특이산성토는 pH가 산성화되며, 식물 가용성 중금속과  $Fe$ ,  $Al$ 의 농도가 증가하는 것으로 알려져 있다(Golez and Kyuma, 1997; Hillwood et al., 2006; Muhrizal et al., 2006). 산성배수의 영향을 받은 토양은 중금속,  $H^+$ ,  $Fe$ ,  $Al$  농도가 높아 식물에 독성을 나타나게 한다.  $Al$ 은 토양에 흡착된  $Na$ ,  $K$ ,  $Ca$ ,  $Mg$ 를 교환하고 용탈을 촉진시키며, 다른 양이온에 비해 토양 입자에 강하게 흡착하여 다른 양이온의 흡착을 방해시켜 유효양이온 교환능력을 저하시킨다.  $Fe$ 는 토양의 표면과 식물 뿌리에 침전되어 식물의 영양분 흡수와 호흡을 방해하고 투수율을 감소시킨다. 따라서 산성배수의 영향을 받은 토양은 물리·화학적 특성의 변화에 의해 식생의 성장이 부진하고 고사하는 사례가 많다(Kim, 2007).

우리나라에서 산성암반배수 발생의 원인이 되는 황철석을 주요 성분으로 포함하고 있는 대표적인 암석층은 평안층 탄층, 옥천층군 변성퇴적암, 중생대 화산암류, 제 3기 퇴적암 및 화산암류이다(Fig. 2.10). 그 외에 경기육괴의 열수변질 편마암, 경상계 퇴적암, 폐광산이 분포하는 금속 광화대도 산성배수 발생 개연성이 높은 것으로 알려져 있다. NIAST(2000)은 김해통, 봉림통, 해척통, 등구통이 우리나라에 분포하고 있는 대표적인 현재성 특이산성토로서 하구 퇴적물의 기원토양으로 구분하였다.

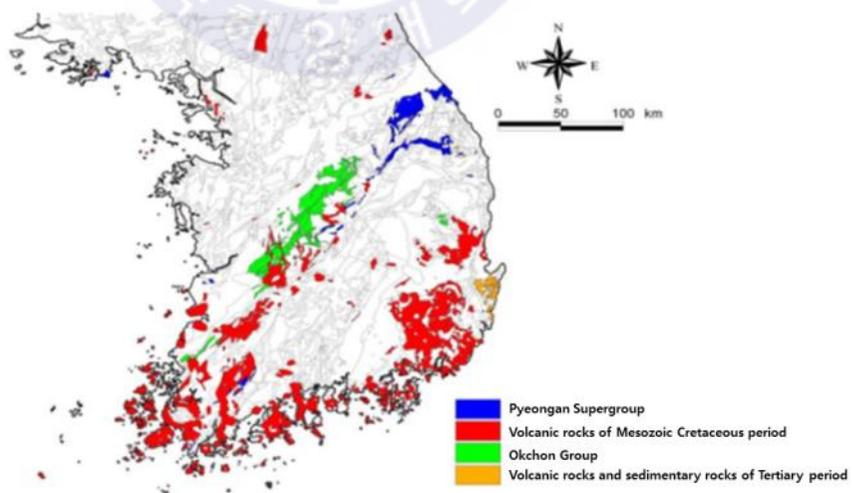


Fig. 2.10 Distribution of acid rock drainage in South Korea(Kim, 2007)

## 2.4.2 산성배수 발생 저감 기술

산성배수에 의한 피해저감기술은 발생된 산성배수의 처리방법과 산성배수 발생 억제방법으로 구분할 수 있다. 이 중 산성배수 처리방법은 많은 연구가 활발하게 진행되어 다양한 기술이 현장에 적용되고 있다. 산성배수 처리방법은 Table 2.5와 같이 생물학적 방법과 무생물학적 방법으로 나눌 수 있으며, 적극적인 처리(active treatment), 소극적 처리(passive treatment)로 세분화할 수 있다.

**Table 2.5** Acid rock drainage treatment technology

Non-biological		Biological	
Active treatment	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Neutralizer added</li> <li>• Oxidant &amp; neutralizer added</li> <li>• Adsorption</li> <li>• Reverse osmosis</li> <li>• High density sludge</li> </ul>	Active treatment	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Off-line sulfidogenic bioreactor</li> </ul>
Passive treatment	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anoxic limestone drainage</li> <li>• Oxidic limestone drainage</li> <li>• Open limestone channels</li> <li>• Limestone diversion well</li> <li>• Reducing and Alkalinity producing system (RAPS)</li> <li>• Reverse alkalinity producing system</li> <li>• Alkalinity producing cover</li> <li>• Slag leach bed</li> <li>• Successive alkalinity producing system (SAPS)</li> <li>• Permeable reactive barrier</li> </ul>	Passive treatment	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aerobic wetland</li> <li>• Compost reactor/wetland</li> <li>• Packed bed iron-oxidation bioreactor</li> <li>• Microbial reactor system</li> <li>• Vertical flow wetland</li> <li>• Permeable reactive barrier (PLB)</li> </ul>

적극적 처리기술은 고농도, 대유량의 조건에서 적합하며, 오염물질 처리에 대한 예측이 가능하고 처리효율이 높은 장점이 있다. 소극적 처리기술은 화학약품의 사용으로 지속해서 교체해주거나 첨가하는 단계가 요구되며, 전력 이외에

도 기타설비의 지속적인 관리가 필요하기 때문에 비용 문제의 단점이 있다. 오염부하가 높은 지역의 산성배수 처리의 경우 다량의 슬러지가 발생하는데 이를 처리하는 방법에 대한 2차적인 문제가 발생하고 있다. 고밀도 슬러지 공정(HDS)은 이 문제를 해결할 수 있는 기술로 산성배수 처리 과정의 슬러지를 폐기하지 않고 재순환하여 투여되는 화학약품의 양과 슬러지 발생량을 줄일 수 있는 주요 기술로 각광받고 있다.

산성배수 발생 억제기술은 다음의 Table 2.6과 같으며, 황철석의 산화 과정을 차단하는 기술이 주된 목적이다. 산성배수 발생 억제기술은 국·내외적으로 많은 연구가 진행되고 있으며, pilot scale의 현장적용시험으로 적용 가능한 연구 결과가 요구된다.

**Table 2.6** Acid rock drainage suppression technology

Basics	Detail technology
Oxidizer removal	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Oxygen removal : organic matter addition</li> <li>· <math>Fe^{3+}</math> removal : neutralizer addition</li> </ul>
Suppress oxidizer production	<ul style="list-style-type: none"> <li>· <math>Fe^{3+}</math> production suppression : germicide treatment</li> </ul>
Blocking oxidizer and pyrite	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Atmospheric blocking : underground storage, solidification, underwater storage</li> <li>· Blocking the pyrite from Oxygen and <math>Fe^{3+}</math> : surface coating</li> </ul>

## 제 3 장 연구 방법

### 3.1 시료선정 및 채취

#### 3.1.1 제 3기 이암

본 연구에 사용되는 이암 시료는 경상북도 포항시 흥해읍 이인리 택지개발지구에 위치한 건설공사현장에서 채취한 미고결 이암으로 토목공사 시 암석의 특성을 충분히 고려하지 않고 토공 재료로 활용될 경우에는 대량의 산성배수가 발생할 뿐 아니라 기초 구조물의 안정성 문제가 우려될 것으로 판단하고 있다 (Fig. 3.1). 시료를 채취한 지역의 이암은 신생대 제 3기 연일층군 두호층과 이동층에 해당하며, 대표적인 암상으로 연갈색 셰일 및 이암과 담갈색 셰일 및 이암이며 역암이 협재한다.



Fig. 3.1 Sampling location of mudstone in Pohang

### 3.1.2 복합슬래그

본 연구에서 사용되는 혼화제로 흔히 철강슬래그로 알려진 복합슬래그가 선정되었으며, 연구 내용에서는 복합슬래그로 통합하여 명칭한다. 입도조정 복합슬래그(MS-25)는 포항제철에서 철강 생산으로 인해 생성된 산업 부산물로 25 mm 이하로 입도 조정된 제강슬래그와 고로슬래그를 7 : 3 비율로 혼합한 슬래그를 뜻하며, 주로 기층 및 보조기층재의 용도로 사용되고 있다. 고로슬래그는 철광석, 코크스, 석회석을 용광로에서 용융시켜 생성된 약 1500°C 선철을 제외한 용융슬래그를 비중 차이를 이용하여 냉각시킨 슬래그를 말하며, 제강슬래그는 선철을 강으로 만들기 위해 철광석과 고압의 산소를 이용해 탄소를 산화하는 공정에서 발생된 후 냉각된 슬래그를 말한다.

혼화제로 입도조정 복합슬래그를 선정한 조건으로 잠재수경성의 특성과 중화능력을 꼽을 수 있다. 복합슬래그는 혼화제로 첨가되는 알칼리 자극제에 의해 잠재수경성이 발현되어 C-S-H계 수화물을 형성하기 때문에 제 3기 이암의 물리적 특성을 보완할 수 있으며, 화학 성분 중 높은 비율의  $CaO$ 이 포함되어 있어 물과의 반응을 통해  $Ca(OH)_2$ 가 생성되어 황산의 중화 및 중금속,  $PO_4^{3-}$  제거가 가능하기 때문에 최적의 혼화제로 판단하였다.

### 3.1.3 중화·코팅제

혼화제로 사용하는 중화·코팅제 중에서 중화제로 선정된 탄산수소나트륨( $NaHCO_3$ )은 약산 음이온으로 물에 녹아 가수분해하여  $OH^-$ 가 생성하므로 수용액은 염기성을 나타낸다. 따라서 복합슬래그의 알칼리 자극제의 역할과 산성배수와 중화제 역할을 동시에 충족할 수 있다고 판단하였다. 코팅제는 Lee et al.(2006)의 황철석 표면에 인산염 피막을 형성시키는 최적 조건에 관한 연구를 참고하였으며, 복합슬래그의 잠재수경성이 발현할 수 있는 조건을 고려하여 산화제와 pH조절제를 제외한 인산일수소칼륨( $K_2HPO_4$ )을 코팅제로 선정하였다.

## 3.2 실내시험

### 3.2.1 시료의 물리·화학적 분석

#### (1) 입도분석시험

첫 번째, 굵은 골재 및 잔 골재의 체가름 시험(KS F 2502)은 이암 시료를 사분법으로 축분하고 배기구가 있는 건조기에서  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  로 건조시키고 표준 체(No. 4, 10, 20, 40, 60, 100, 200)에 넣고 체진동기를 통해 입도분포곡선을 구하고 통일분류법(UCSC)에 의해 분류하였다. 두 번째, 레이저 회절 입도 분석기(Mastersizer 3000)를 통해 시료를 분석하였으며 입자는 비구형 타입, 분산제는 증류수, 교반속도는 2500 RPM, 초음파 60%의 조건으로 실시하였다.

#### (2) 비중시험 (KS F 2308)

자연 건조한 이암 시료 중 9.5 mm 체를 통과한 시료를 선정하여 비중병에 시료와 증류수를 넣고 질량과 온도를 측정한다. 다음으로 증류수만으로 질량과 온도를 측정하여 비중 값을 계산하였으며, 표준온도  $15^\circ\text{C}$  에 맞는 온도 보정을 통해 최종 값을 산출하였다.

#### (3) 액·소성한계시험 (KS F 2303)

자연 함수비 상태의 이암 시료 중 0.425 mm (No. 40)를 통과한 시료를 액성한계시험 장치의 황동 접시에 10 mm 두께로 넣고 흡파기 날로 중심선에 흠을 판 후에 황동 접시를  $10 \pm 0.1$  mm에서 낙하시키면서 시료가 맞닿았을 경우의 결과 중에서 25회 낙하횟수일 경우의 시료의 함수비를 적고 액성한계 값을 구한다. 소성한계는 0.425 mm (No. 40)를 통과한 시료를 반죽하여 둥근 봉 모양의 지름 3 mm의 실 모양으로 만들면서 시료가 3 mm의 굵기에서 끊어질 때의 시료들을 모아 함수비를 구해 소성한계의 값을 구하였다.

### (3) X선 형광분석시험 (XRF)

완전 건조하고 200 mesh( $< 75 \mu\text{m}$ ) 이하로 분쇄한 이암 시료를 파장분산형 X-선 형광분석기(Shimadzu)에 넣고 X-선을 주사한 뒤, 시료에서 발생하는 형광 X-선을 이용하여 정량 분석을 실시하였다.

### (4) X선 회절분석시험 (XRD)

완전 건조하고 200 mesh 이하로 분쇄한 이암 시료를 막대사발에 넣어 더 곱게 갈아준 뒤, X-선 시료대에 넣고 유리판으로 시료의 표면을 평탄하게 만든 상태에서 입사각과 회절각을 표준 시료와 비교하여 함유 광물을 분석하였다. 회절 기록은 ASTM의 JCPDS(Joint Committee of Powder Diffraction Standard)에서 발행한 분말 회절 데이터를 이용하였다.

### (6) 다짐시험 (KS F 2312)

50°C 이하로 건조한 이암 시료 중 19 mm 체를 통과한 시료를 선정하여 비반복 건조법으로 시험을 선택하였으며 D 다짐 방법을 채택하여 시험을 진행하였다. 4.5 kg의 레머를 수직낙하시켜 층 당 55회로 5층 다짐을 진행하여 최대 건조 밀도( $\gamma_{dmax}$ )와 그에 대응하는 최적함수비( $w_{opt}$ )를 구하였다.

### (7) 일축압축강도시험 (KS F 2314)

이암의 물리적 특성으로 인하여 시추코어를 채취하기 어려워 공시체를 직접 제작을 실시하였으며, 공시체의 조건으로 완전 건조한 이암 시료를 다짐시험을 통해 얻어진 최적함수비에 맞춰 함수량을 조정하였고, 양면 분할이 가능하게 자체 제작한 몰드를 사용하여 지름 5 cm, 높이 10 cm의 원주형 일축압축 공시체를 D 다짐 방법의 층당 55회 다짐 횟수와 5층의 다짐 층으로 제작하였다. 양생 조건은 재령 7일의 양생 기간과 온도  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 공기 중 양생으로 설정하였

다. 양생된 공시체는 YUL-5T(Yeon Co., Ltd) 일축압축시험기를 이용하여 압축 강도를 측정하였으며, 1 mm/min의 하중 속도로 하중을 가하여 파괴될 때의 하중과 변화율을 측정하였다.

#### (8) 증류수 반응

이암 시료가 지표에 처음으로 노출되었을 경우의 상태를 알아보기 위한 실험으로 시료를 증류수와 1 : 2 비율의 슬러리 상태로 혼합하여 12시간 이상 반응하여 안정화시킨 후, HQ11d 측정기(HACH)를 이용하여 pH와 EC를 측정하였다.

#### (9) 양이온 분석(ICP)

이암 시료를 토양오염공정시험법 중 산분해(왕수추출)법을 택하고 염산과 질산을 사용하여 전처리 과정을 거친 반응용액을 0.45 $\mu$ m membrane filter로 여과시키고 유도 결합 플라즈마 분광 분석기(ULTIMA 2)를 이용하여 중금속을 중점으로 하여 16가지 양이온 함량을 분석하였다.

#### (10) 음이온 분석(IC)

이암 시료를 NAG pH 용출법을 통해 실험한 반응용액을 0.45 $\mu$ m membrane filter에 여과시킨 후, 이온 크로마토그래피(IC, 881 Compact IC pro)를 이용하여 7가지 음이온을 분석하였으며, 산성배수의 발생 정도를 알아보기 위해 황산염(Sulfate) 함량을 중점적으로 정밀 분석하였다.

### 3.2.2 산성배수 발생 및 개연성 평가

#### (1) Total S

총 황 함량 분석은 원소분석기(vario MACRO cube)를 이용하였으며, 이암 시료를 열풍 건조기에서 완전 건조하고 200 mesh 이하로 파쇄한 후에 100 mg으로 정량하였다. 850 ~ 1150°C 연소법으로 C, H, N, S(%) 함량을 분석을 실시하였으며, 분석된 황 함량(%)을 이용하여 ARD test hand book(2002)에서 제시하는 식 (1)을 통하여 최대 산 발생량(MPA)를 산출하였다.

$$MPA(kg H_2SO_4 / t) = \text{Total S}(\%) \times 30.6 \quad (1)$$

식 (1)은 모든 황이 황철석으로 가정하고 황 함량이 1%로 측정되었을 경우에 톤 당 30.6 kg의  $H_2SO_4$ 가 발생한다고 해석한다.

#### (2) ANC test

산 중화 용량(Acid Neutralization Capacity) 실험은 이암 시료 내 황화광물로 인해 생성된 산성배수를 자체 구성 광물이 중화할 수 있는 능력을 평가하는 방법이다. 우선 Fizz test를 통해  $CaCO_3$  유무를 확인하기 위해서 시료에 8%  $HCl$ 을 서너 방울 떨어뜨려 Table 3.1과 비교해보며 반응에 상응하는  $HCl$ 과  $NaOH$ 의 농도와 부피를 결정한다. 완전 건조되고 200 mesh 이하로 분쇄된 이암 시료 2 g을 Fizz test에 의해 결정된  $HCl$ 과 반응시켜주고 증류수 20 mL를 첨가해준다. 다음으로 80 ~ 90°C로 2시간 이상 가열하여 반응을 종료시킨 후, 125 mL까지 증류수로 부피를 맞춰주고 상온에서 감온시킨 뒤 반응용액의 pH 0.8 ~ 1.5 사이의 범위 여부를 확인한다. 반응용액이 pH 범위에 들어오지 않으면 Fizz test부터 재실험을 실시한다. 범위 안에 들어오는 반응용액은 결정된  $NaOH$ 로 pH 5까지 적정한 후 30%  $H_2O_2$ 를 미량 주입하여  $Fe^{2+}$ 를 산화시킨다. 반응용액을 다시 pH 7까지 적정하고  $NaOH$  투입량을 기록하면 실험이 종료되며 추가로 시료의 Fizz rating 마다 대조군을 만들어 시료첨가를 제외한 모든 실험 절차를

시행한 후에 식 (2)와 같이 ANC를 산출해낸다(Sobek et al., 1978).

$$ANC = \frac{Y \times M_{HCl}}{w_t} \times C \quad (2)$$

여기서  $Y = (\text{Vol. of HCl added}) - (\text{Vol. of NaOH titrated}) \times B$

$$B = \frac{(\text{Vol. of HCl Blank})}{(\text{Vol. of NaOH titrated Blank})}$$

여기서,  $M_{HCl}$ 는 몰농도,  $w_t$ 는 시료무게,  $C=49.0$  ( $kg H_2SO_4 / t$ )이다.

ANC 결과 값이 Table 3.2에 제시된 범위 내에 있는지 확인한다.

**Table 3.1** “Fizz Ratings“ and Associated Acid Quantities and Concentrations to be used in the ANC Determination

Reaction	Fizz Rating	HCl		NaOH
		Molarity (M)	Vol. (mL)	Molarity (M)
No Reaction	0	0.5	4	0.1
Slight Reaction	1	0.5	8	0.1
Moderate Reaction	2	0.5	20	0.5
Strong Reaction	3	0.5	40	0.5
Very strong Reaction	4	1.0	40	0.5
	5*	1.0	60	0.5

- 5\* is used for very high ANC material ( $> 400 kg H_2SO_4 / t$ ) e.g. limestone

**Table 3.2** Recommended ANC Ranges for Each Fizz Rating

Fizz rating	0	1	2	3	4	5
Minimum ANC	0	10	40	100	200	400
Maximum ANC	10	40	100	200	400	-

(3) NAG pH

순 산 발생량(Net Acid Generation) 실험은 이암 시료 내 황화광물을 강제로 산화시키는 방법으로 15%  $H_2O_2$ 와 완전 건조된 200 mesh 이하의 이암 시료를 100 : 1 비율로 희석하여 12 시간 이상 반응시킨다. 반응한 용액을 80 ~ 90°C의 온도로 서서히 가열해주면서 희석한 비율의 부피를 증류수로 유지해 준다. 이 단계는 남아있는  $H_2O_2$ 를 분해시키는 과정이다. 분해 과정을 마친 용액을 Table 3.3과 대조하여 NAG pH 값에 따른  $NaOH$  농도를 투입하여 pH 4.5까지 적정한다. 실험이 종료되면 식 (3)과 같이 NAG 값을 산출하고 Table 3.4에 따라 시료의 산 발생 잠재력을 평가한다(Smart et al., 2002).

**Table 3.3** NaOH titration molar value according to NAG pH

NAG pH > 2	Titrate with 0.1 M $NaOH$	Titrate (with continuous stirring) the NAG liquor to pH 4.5
NAG pH ≤ 2	Titrate with 0.5 M $NaOH$	

$$NAG(kg H_2SO_4/t) = \frac{put NaOH Vol(ml) \times put NaOH (M) \times 49}{Sample weight (g)} \quad (3)$$

**Table 3.4** An indication of the acid potential of a sample

NAG pH	NAG ( $kg H_2SO_4/t$ )	Acid Potential Sample
= 4.5	0	Non-acid forming (NAF)
< 4.5	5	Potentially acid forming-lower capacity (PAF-LC)
< 4.5	> 5	Potential acid forming (PAF)

(4) NAPP

순 산 발생 잠재력(Net Acid Producing Potential)은 최대 잠재적 산도(MPA)와 산 중화 용량(ANC)의 차의 값으로  $NAPP > 0$  이면 산성배수 발생 개연성이 높은 것으로 판단한다(Smart et al., 2002).

(5) 산성배수 발생 암석 판단 및 평가

Total S, ANC, NAG pH 실험 결과를 기준으로 시료의 산성배수 발생 개연성을 평가하는데 첫 번째, ANC/MPA 값을 이용하여 안전율을 계산하고  $NAPP = 1$  을 기준으로 산성배수가 발생할 가능성을 간단하게 표현할 수 있으며 두 번째, NAPP와 NAG pH 값을 지화학적 분류도에 표시하여 정밀한 평가를 할 수 있다. 이 두 가지 방법의 측정된 값을 산성배수 암석 흐름도에 대조함으로써 시료의 산성배수 발생 개연성을 용이하게 분류할 수 있다(Fig 3.2). 여기서 이 흐름도에 의해 결정되는 시료는 Non-Acid Forming(NAF), Potentially Acid Forming(PAF), Uncertain(UC)과 같은 3종류의 범주로 분류된다.

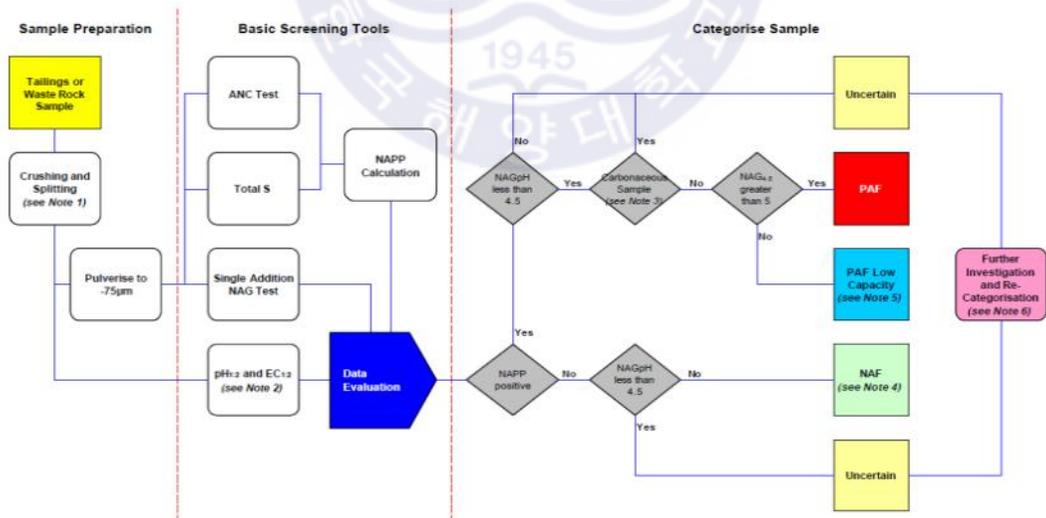


Fig. 3.2 Flow Chart showing ARD screening tests, decision nodes and ARD rock type categories (Smart et al., 2002)

### 3.2.3 빗물에 의한 산성배수 발생속도 분석

본 연구에 사용된 이암 시료가 빗물에 의해 산성배수 발생하는 속도와 코팅제의 효과를 알아보기 위한 실험을 진행하였다. 빗물과 완전 건조된 200 mesh 이하의 이암을 100 : 1 비율로 희석하여 반응시켰으며, 실험군으로 시료에 0.1%  $K_2HPO_4$  용액을 1mL, 3mL 씩 첨가하여 충분히 반응시킨 후 빗물을 주입하였다. 대조군은 코팅제를 처리하지 않았으며, 측정 기간은 20일 주기로 pH와 온도를 확인함으로써 산성배수가 발생하는 시기를 판단하였다.

### 3.2.4 복합슬래그의 중화능력 평가

복합슬래그의 물성 및 화학적 분석을 실시하였고, 복합슬래그의 중화능력을 평가하기 위해 최대 산 발생량(MPA)와 산 중화량(ANC)의 관계식을 이용하였다. 먼저, MPA에서 황 함량(%)에 대한 톤 당  $H_2SO_4$  를  $CaCO_3$ 으로 분자량으로 나누어 식 (4)와 같이 변환하였다.

$$MPA(kg CaCO_3 / t) = \text{Total S}(\%) \times 30.6 \times \frac{100.09 (CaCO_3 \text{ 분자량})}{98.08 (H_2SO_4 \text{ 분자량})} \quad (4)$$

식 (4)는 모든 황이 황철석으로 가정하고 황 함량이 1%로 측정되었을 경우에  $CaCO_3$ 의 필요량은 톤 당 31.23 kg으로 계산되었다. ANC의 계산식에 요구되는 변환요소 C 값을 50으로 바꿔줌으로서  $CaCO_3$ 의 필요량으로 변환하고  $CaCO_3$  중화량을 기준으로 설정하여 복합슬래그의 중화량과의 관계식을 다음과 같이 형성한다(Fig. 3.3).

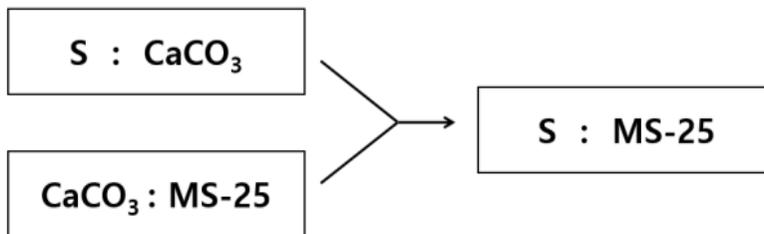


Fig. 3.3 Relations between S and MS-25

복합슬래그의 중화능력을 평가하기 위한 다른 방법으로 첨가반응 실험을 실시하였다. 이암 시료 1.25 g에 15%  $H_2O_2$ 을 반응시켜 시료 내 모든 황산염을 산화시키는 NAG pH 실험을 진행하였고, 초기 pH에 측정하고 복합슬래그를 0.02 g씩 하루 단위로 첨가하여 반응 과정을 지켜보면서 pH 7 이상까지 높아졌을 때의 복합슬래그의 총 첨가량을 구하였다. 다음으로 이암 시료별 황 함량(%)을 통해 1.25 g 내에 들어 있는 황 함량(g)을 구하고 복합슬래그 첨가량(g)과의 비율을 계산함으로써 이암 시료 내 1% 황 함량에 따른 복합슬래그의 첨가량 비율(%)을 산출하였다.

### 3.2.5 배합설계기준 및 방법

제 3기 이암에 복합슬래그와 중화·코팅제처리를 위한 적절한 혼합비율 알아보기 위해 배합설계를 실시하였다. 제 3기 이암을 기준으로 복합슬래그의 혼합비율은 0%, 10%, 20%로 설정하였으며, 중화·코팅제는 각각의 혼합비율에 대하여 처리/무처리로 설정하여 총 6 가지 방법의 혼합비율에 대한 배합설계를 진행하였다. 혼합비율에 대한 개량토의 기본적인 물성 및 역학적 시험을 진행하였고, 시험 결과가 한국도로공사(KEC)의 고속도로 건설재료 품질기준(2017)에 대한 부합 여부를 판단하였다(Table 3.5). 추가로 개량토의 산성배수 발생을 방지 및 억제하기 위한 슬래그 혼합비율을 검토함으로써 제 3기 이암의 물리적·화학적 특성을 모두 보완하며, 경제성을 고려한 효율적인 혼합비율을 도출하는 시험을 진행하였다.

Table. 3.5 Material standard of road bed filled up ground(KEC, 2017)

구 분		단위	노체		
			암성토	일반토	
최대치수		mm	600 이하	300 이하	
수정 CBR		%	-	2.5 이상	
5 mm체 통과율		%	-	-	
소성지수		%	-	-	
액성한계		%	-	-	
마모감량		%	-	-	
모래당량		%	-	-	
다짐 후 1층 두께		cm	60 이하	30 이하	
실내다짐 시험방법		-	-	A, B 방법	
다짐도		%	-	90 이상	
현장밀도	상대밀도 ( $D_r$ )	%	70 이상	-	
입도분포	균등계수 ( $C_u$ )	-	자갈 : $C_u \geq 4$ 모래 : $C_u \geq 6$	-	
	곡률계수 ( $C_g$ )	-	$1 < C_g < 3$	-	
평판 재하 시험	AP 포장	침하량	cm	0.125	0.25
		지지력계수 ( $K_{30}$ )	MN/r	200 이상	150 이상
	시멘트 포장	침하량	cm	0.125	0.125
		지지력계수 ( $K_{30}$ )	MN/r	200 이상	100 이상
성토재의 일반기준		액성한계 50% 미만, 건조밀도 $1.5t/m^3$ 초과 소성한계 25% 미만, 간극률 42% 미만			

### 3.3 현장 시험

#### 3.3.1 성토구조체 설계

성토구조체는 도로설계편람(2012)의 기준에 따른 실내시험 결과를 준수하며 설계를 실시하였고 하부 폭 11.5 m, 길이 14.0 m, 높이 2.5 m, 경사 1 : 1.5 규모이며, 다짐 두께는 30 cm 이하로 시공하였다. 제 3기 이암과 복합슬래그를 중량비로 혼합하는 장비가 부재하므로 Table 3.6과 같이 중량비에 최대건조단위중량을 나뉘춤으로써 체적비로 환산하여 혼합하는 방법을 고안하였다. 체적비에 대한 혼합공법으로 채버킷을 이용한 백호 혼합을 선정하였는데, 이는 경제적이면서도 간단한 공정과정의 장점을 갖고 있으므로 적합하다고 판단하였다.

Table 3.6 Calculation method of mixing ratio

Case	Weight ratio (%)	Volume ratio (%)	Field volume ratio
Mudstone (100%)	0	0	1 : 0
Mudstone (90%) + MS-25 (10%)	10	6.52	13 : 1

각 구간은 토류관으로 분할하였으며 사전처리구간, 사후처리구간, 가적치구간으로 개별 시공하였다. 사전처리구간은 앞서 배합설계한 제 3기 이암에 복합슬래그를 혼합하고 중화·코팅제를 처리한 시공을 진행하였으며, 사후처리구간은 산성배수 발생을 염두에 둔 무처리 구간으로 시공하였으며, 차후 성토구조체를 천공하여 중화제 주입시공을 진행할 계획으로 설계되어 있다. 가적치구간은 토목공사에서 제 3기 이암을 성토재나 순성토로 사용하기 전에 중화·코팅제 처리하여 개량했을 경우를 검토하기 위한 구간으로 설계되었다(Fig. 3.4).

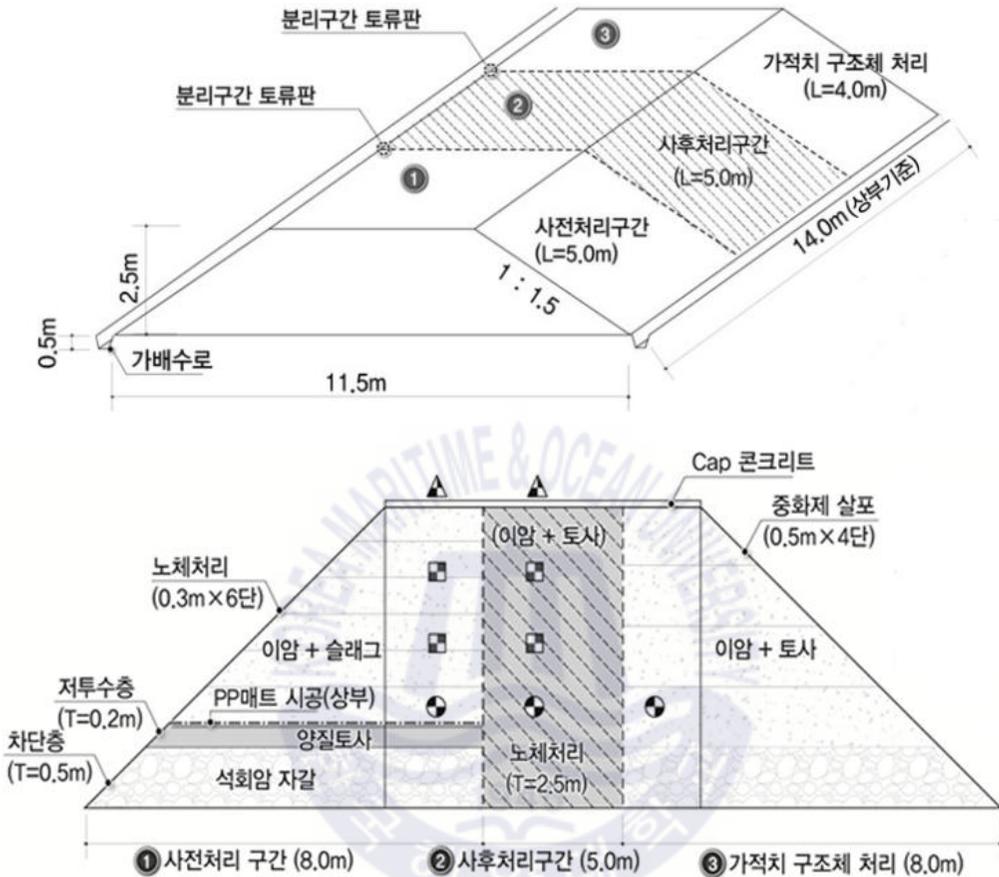


Fig. 3.4 Detail drawing of banking structure field test (Cha et al., 2018)

### 3.3.2 성토구조체의 노체기준 평가

#### (1) 현장밀도시험 (KS F 2311)

모래 치환법을 이용하여 현장밀도시험을 실시하였는데, 먼저 강륜 롤러로 다짐된 노반에 밀판을 설치해주고 주변 흙이 교란되지 않게 시험구멍을 파낸 후, 밀판에 깔때기와 모래 측정기를 고정시키고 밸브를 열어 시험구멍에 시험용 모래를 채워 넣는다. 시험이 진행된 시험구멍의 부피와 파낸 흙 질량, 시험구멍으

로 들어간 모래 질량을 이용하여 현장 건조단위중량을 계산하였으며, 실내시험으로 산출된 최대건조단위중량과 관계식을 통해 상대다짐도(RC)를 산출하였다.

## (2) 평판재하시험 (KS F 2310)

다짐된 노반에 시험용 재하판을 설치하고 그 위에 유압잭을 올려놓고 지지력 측정장치와 조합한다. 재하장치로는 강륜롤러를 이용했으며, 침하량 측정장치는 지지하는 지점에서 1 m 이상 떨어져 배치한 뒤, 하중강도를 점차 증가시킴에 따라 달라지는 침하량을 측정한다. 하중강도-침하량 곡선에서 설정한 일정 침하량일 때의 하중강도를 구하여 지반반력계수( $K_s$ )를 산출하였다.

## (3) 투수계수시험 (KS F 2322)

흙의 투수시험에서 점성토에 적용하는 변수위 삼축투수시험을 택하였으며, 시험을 통해 유입수가 구속압을 받는 흙 시료를 빠져나갈 때의 스탠드 파이프의 수위변화와 시간을 측정하고, 측정할 때의 수온과 투수계수를 수온 15°C에서의 보정계수를 이용하여 투수계수 값을 보정하여 결과 값을 산출하였다.

### 3.3.3 성토구조체 모니터링 계측 시스템

성토구조체의 구간별 변화 추이를 파악하기 위해 계측기기 pH meter, Settlement meter, TDR를 설치하였다. 각 구간의 경사면 최하단부에 위치하도록 설치된 pH meter(CSIM 11, Campbell)는 강수발생 시 처리구간별 중화능력 및 산성배수 발생 정도를 확인하였으며, Settlement meter(SDT-A, ZIS)는 처리구간의 상단부에 설치함으로써 변형 및 침하량을 측정하였다. TDR(Trime-Pico 64, IMKO)은 성토구조체 상·하부층에 설치하여 함수량 변화와 중력배수의 흐름을 파악하였다(Fig. 3.5). 추가로 Data Acquisition System(DAS)을 설치하여 계측 자료의 실시간 저장 및 관리를 가능하도록 구축하였다(Fig. 3.6).

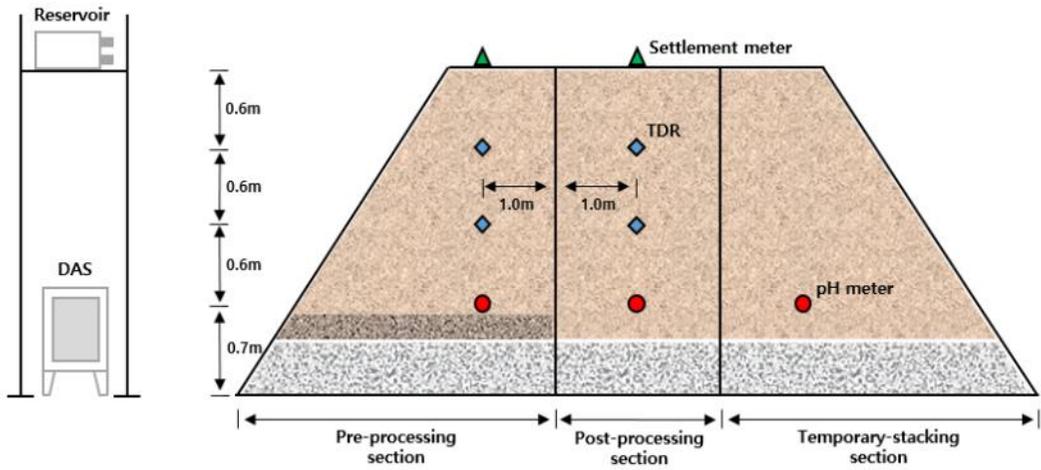


Fig. 3.5 Detail drawing of field monitoring system



Fig. 3.6 Field monitoring system program

### 3.3.4 사후처리구간 중화·코팅제 주입

사후처리구간은 시공이 완료된 성토구조체에서 산성배수가 발생할 경우를 예상하여 중화·코팅제 주입시공을 통해 중화처리 효과와 주입제의 확산경로를 검토하기 위한 구간이다. 중화·코팅제 주입시공 시험 구간은 하부 폭 11.5 m, 길이 5 m, 높이 2.5 m, 경사 1 : 1.5 규모이며, 천공 위치는 사후처리구간 상단으로부터 0.7 m 아래에 위치한 지점에 시공 현장의 적용성을 고려해서 선정된 유압식 크롤러 드릴을 이용하였고, 1 m 간격으로 총 5공을 천공하였다. 여기서 천공 직경은 85 mm이며, 천공 경사는 0 ~ 5°로 설정하였다. 중화제 주입부는 홀 사이즈가 0.7 cm인 유공관을 부직포로 감싸고 천공한 부분에 삽입한 뒤, 물탱크와 연결하는 것으로 설계하였다. 중화·코팅제 주입방법은 위치수두에 의한 주입압 7 kPa를 이용하여 저압 주입하는 것으로 설계하였다(Fig. 3.7).

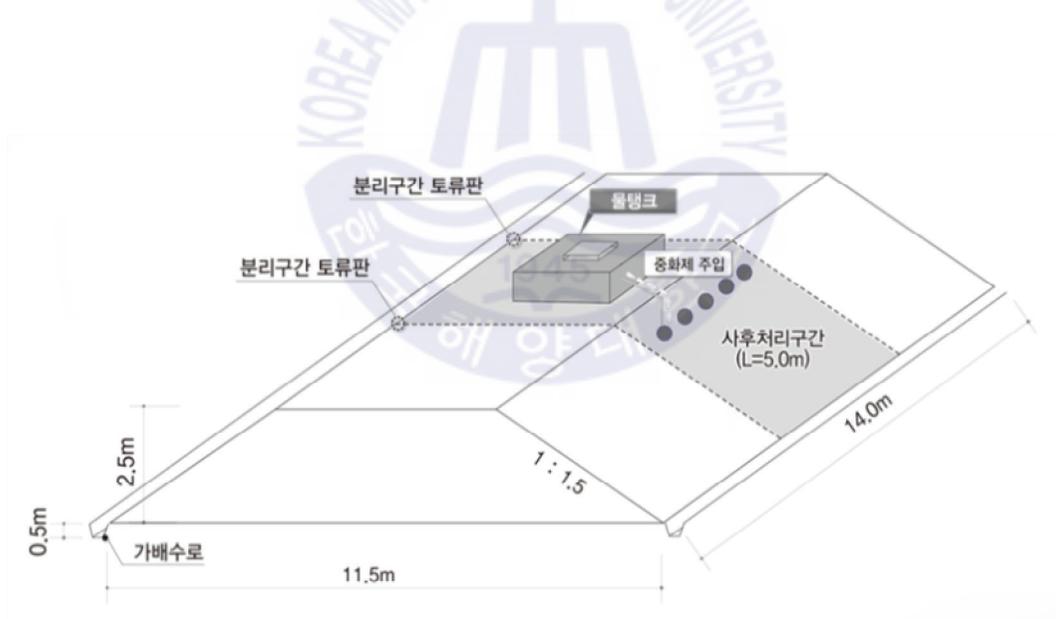


Fig. 3.7 Detail drawing of neutralizing and coating agent injection test (DMCM, 2019)

중화·코팅제의 주입량 산정 방법으로 먼저 사후처리구간의 체적( $m^3$ )에 대하여 건설공사 표준품셈(2019)의 점토 단위중량을 참고하여 중량(ton) 단위로 변환하였다. 중량으로 변환한 값에 실내시험에서 시행한 다짐시험을 통해 얻은 간극비와 모니터링 계측 시스템으로 측정되는 실시간 함수량을 고려하여 사후처리구간 내에 위치하는 제 3기 이암이 목표로 설정한 함수량이 될 때까지의 주입량(ton)을 산정하였다.

다음은 중화·코팅제 주입량 산정으로 산성배수 발생 개연성 평가방법 중 Total S 실험의 식 (1)을 이용해 제 3기 이암의 황 함량(%)에 대한 탄산수소나트륨의 양( $kg NaHCO_3/t$ )을 환산하여 중화제 처리량(%)을 계산하였다. 최종적으로 제 3기 이암의 중화제 주입량(ton)에 대한 중화제 처리량(%)을 산출하였는데, 현장 시험에 동원되는 살수차 탱크의 최대 허용용량이 5 ton으로 제한됨에 따라 이를 고려하여 희석한 중화제 처리량(%)을 계산하여 중화·코팅제 주입시공을 실시하였다.

마지막으로 주입시공의 유용성과 주입량에 대한 적절성 여부를 파악하기 위해 사후처리구간의 중화·코팅제 주입시공 7일 후, 단면굴착을 실시하여 육안으로 중화·코팅제의 확산 경로를 파악하였고 휴대용 pH meter(HACH)를 이용하여 pH 변화를 확인하였다.

## 제 4 장 연구 결과 및 고찰

### 4.1 실내시험 결과

#### 4.1.1 이암의 입도분류와 물성 분석

##### (1) 입도분포

레이저 회절 입도 분석기(Mastersizer 3000)를 이용한 제 3기 이암의 입도분석 결과는 Fig. 4.1과 같으며, 측정된 값을 백분율로 나타내어 Table 4.1에 정리하였다. Fig. 4.2는 제 3기 이암을 삼각좌표분류법으로 나타낸 결과로 실트질 50% 이상, 점토질 20% 이하로 조성된 흙으로 실트질 롬(Silty loam)으로 분류되었다.

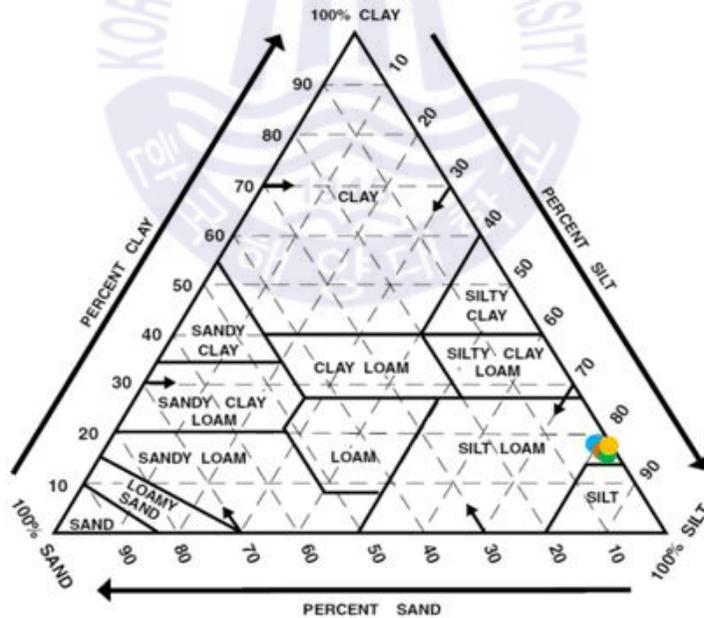


Fig. 4.1 Results graph of particle size analysis

**Table 4.1** Measurement results of particle size analysis

Sample	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Gravel (%)
EN-R1	17.26	79.71	3.01	0.00
EN-R2	19.27	77.75	2.98	0.00
EN-R3	20.06	77.10	2.80	0.00
EN-R4	20.43	78.23	1.32	0.00

- Clay : < 2  $\mu\text{m}$
- Silt : 2 ~ 50 $\mu\text{m}$
- Sand : 50 ~ 2000  $\mu\text{m}$
- Gravel : > 2000  $\mu\text{m}$



**Fig. 4.2** Soil texture triangle

(2) 통일분류법 및 물성 분석

체가름 시험을 실시하여 제 3기 이암의 입도분포곡선을 Fig. 4.3과 같이 작성하였으며, 균등계수( $C_u$ )와 곡률계수( $C_g$ )는 60% 이하의 통과중량백분율을 알 수 없어 계수 값을 산출하지 못하였다. 계수 값 이외의 제 3기 이암의 액성한계(LL), 소성한계(PL)는 도로공사 성토재 일반 기준에 부적합하였으며, 비중( $G_s$ )은 2.551로 산출되어 Table 4.2에 나타내었다. 흙의 분류는 Table 4.3의 통일분류법(USCS) 기준을 이용했으며, CH(압축성이 큰 점토)로 분류되었다.

Table 4.2 Physical characteristics of the mudstone

Sieve (mm)	Percent of passing weight (%)						
	< 4.75	< 2.00	< 0.845	< 0.425	< 0.250	< 0.075	< 0.005
	97.6	96.7	95.7	94.8	94.1	93.4	58.2
EN-R	$G_s$	$C_u$	$C_g$	LL (%)	PL (%)	U.S.C.S	
	2.551	-	-	66.6	41.7	CH	

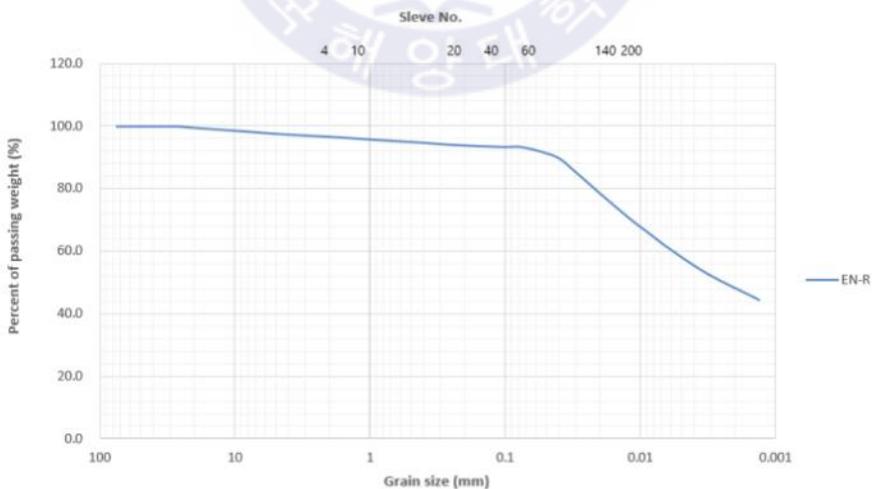


Fig. 4.3 Grain-size distribution curve

**Table 4.3** Soil classification chart(ASTM, 2000)

Soil Classification				Group Symbol	Group Name
<b>COARSE-GRAINED SOILS</b>  More than 50 % retained on No. 200 sieve	<b>(G) gravel</b> More than 50 % of coarse fraction retained on No. 4 sieve	Clean Gravels	$C_u \geq 4, 1 \leq C_c \leq 3$	<b>GW</b>	Well-graded gravel
		Less than 5 % fines	Not satisfied of above criteria	<b>GP</b>	Poorly graded gravel
		Gravels with Fines	Fines classify as ML or MH	<b>GM</b>	Silty gravel
		More than 12 % fines	Fines classify as CL or CH	<b>GC</b>	Clayey gravel
	<b>(S)and</b> 50 % or more of coarse fraction passes No. 4 sieve	Clean Sands	$C_u \geq 6, 1 \leq C_c \leq 3$	<b>SW</b>	Well-graded sand
		Less than 5 % fines	Not satisfied of above criteria	<b>SP</b>	Poorly graded sand
		Sands with Fines	Fines classify as ML or MH	<b>SM</b>	Silty sand
		More than 12 % fines	Fines classify as CL or CH	<b>SC</b>	Clayey sand
<b>FINE-GRAINED SOILS</b>  50 % or more passes the No. 200 seive	<b>(S)ilts and (C)lays</b> Liquid limit less than 50	inorganic	$PI > 7$ and plots on or above "A" line	<b>CL</b>	Lean clay
			$PI < 4$ and plots below "A" line	<b>ML</b>	Silt
		organic	Liquid limit - oven dried < 0.75	<b>OL</b>	Organic clay
			Liquid limit - not dried		Organic silt
	<b>(S)ilts and (C)lays</b> Liquid limit 50 or more	inorganic	$PI$ plots on or above "A" line	<b>CH</b>	Fat clay
			$PI$ plots below "A" line	<b>MH</b>	Elastic silt
		organic	Liquid limit - oven dried < 0.75	<b>OH</b>	Organic clay
			Liquid limit - not dried		Organic silt
<b>HIGHLY ORGANIC SOILS</b>	Primarily organic matter, dark in color, and organic odor			<b>PT</b>	Peat

두 가지 입도분석방법의 흙의 분류 결과가 상이하지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 제 3기 이암의 특성을 고려해 볼 필요가 있다. 제 3기 이암은 완전한 고결화가 진행되지 않았으며, 점토성분을 많이 함유하고 있다. 따라서 수분 접촉을 통해 분산작용을 실시한 삼각좌표분류법의 입도분석결과가 더 적합하다고 생각된다. 하지만 삼각좌표분류법은 연경도(Consistency)를 고려하지 않은 분류법이기에 때문에 필수적으로 공학적 차원의 통일분류법을 병행하여 해석하는 것이 옳다고 판단된다.

### (3) X선 형광분석

XRF 분석을 통해 제 3기 이암의 화학분석을 수행한 결과는 Table 4.4와 같다. 주로  $SiO_2$  성분이 약 60%로 가장 많이 포함되어 있으며, 다음으로  $Al_2O_3$ 와  $Fe_2O_3$  순으로 산성배수 발생 개연성이 높은 산화물이 많이 존재하는 것으로 나타났다. 하지만 같은 제 3기 이암이라도 시료를 채취한 지점마다  $CaO$  함량이 확연한 차이가 나는 것으로 분석되었다.

Table 4.4 XRF analysis results

Component		EN-R1	EN-R2	EN-R3	EN-R4
$SiO_2$	wt. (%)	63.79	62.30	61.37	62.87
$Al_2O_3$		12.86	11.83	13.55	13.91
$Fe_2O_3$		5.38	4.88	5.12	5.60
$CaO$		1.95	4.38	3.10	1.34
$MgO$		1.40	1.29	1.43	1.53
$K_2O$		2.12	1.81	2.26	2.35
$Na_2O$		1.05	0.87	1.37	1.17
$TiO_2$		0.55	0.47	0.58	0.61
$MnO$		0.16	0.15	0.14	0.12
$P_2O_5$		0.09	0.21	0.11	0.10
<i>Igloss</i>		10.05	10.92	10.30	9.92

#### (4) X선 회절분석

XRD 분석을 통한 제 3기 이암의 시료채취 지점별 회절분석 결과는 Fig. 4.4, Fig. 4.5, Fig. 4.6, Fig. 4.7에 나타내었다. 주요 구성 광물로 석영, 장석류, 운모류, 몬모릴로나이트, 일라이트, 카올리나이트, 녹니석, 방해석, 황철석을 포함하고 있다. 모든 이암 시료의 특징으로는 점토광물인 몬모릴로나이트와 일라이트가 존재하는데, 이로 인해 이암의 흡수팽창으로 지반침하 및 연약화 위험이 높다고 판단된다. 또한 황철석을 포함하고 있어 산성배수 발생 개연성이 높으며, 산성배수 발생 시 이암 내 광물들의 용출로 지반의 안정성에 대한 추가적인 위험요소의 여지가 충분하다고 판단된다.

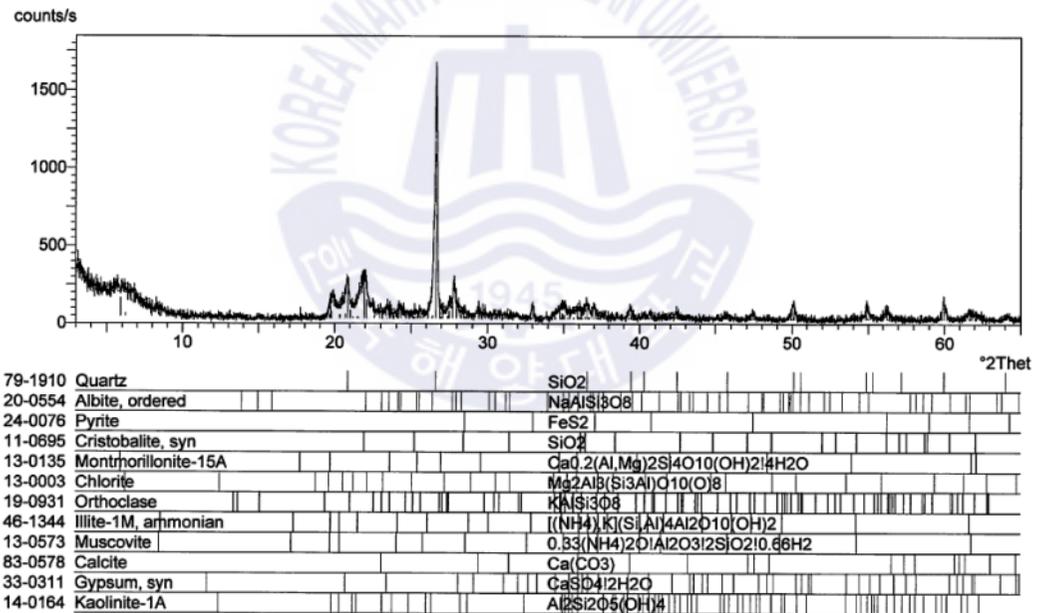


Fig. 4.4 X-ray diffraction patterns of mudstone(EN-R1)

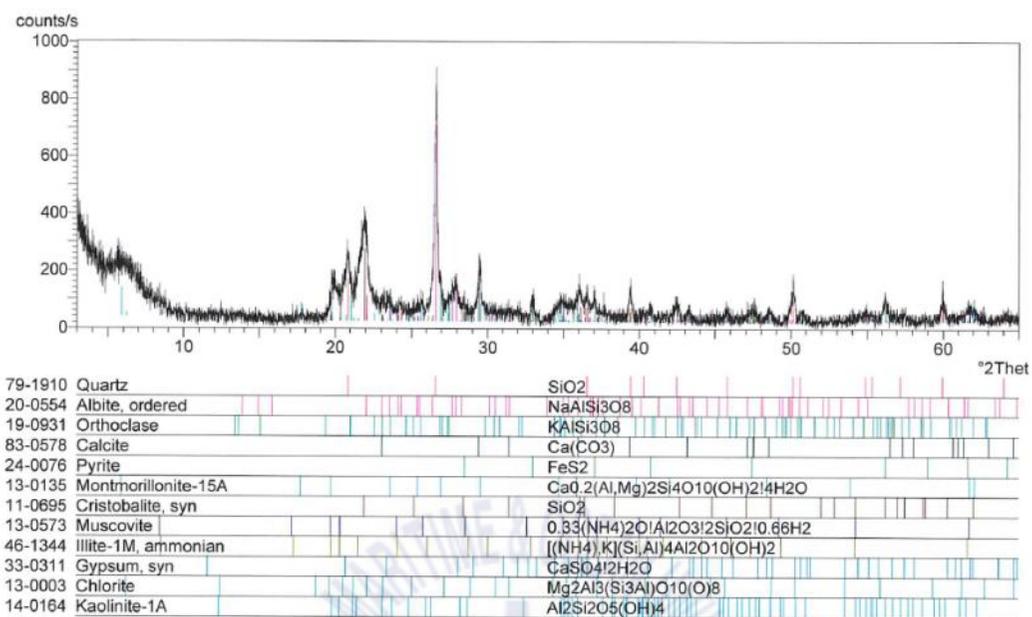


Fig. 4.5 X-ray diffraction patterns of mudstone(EN-R2)

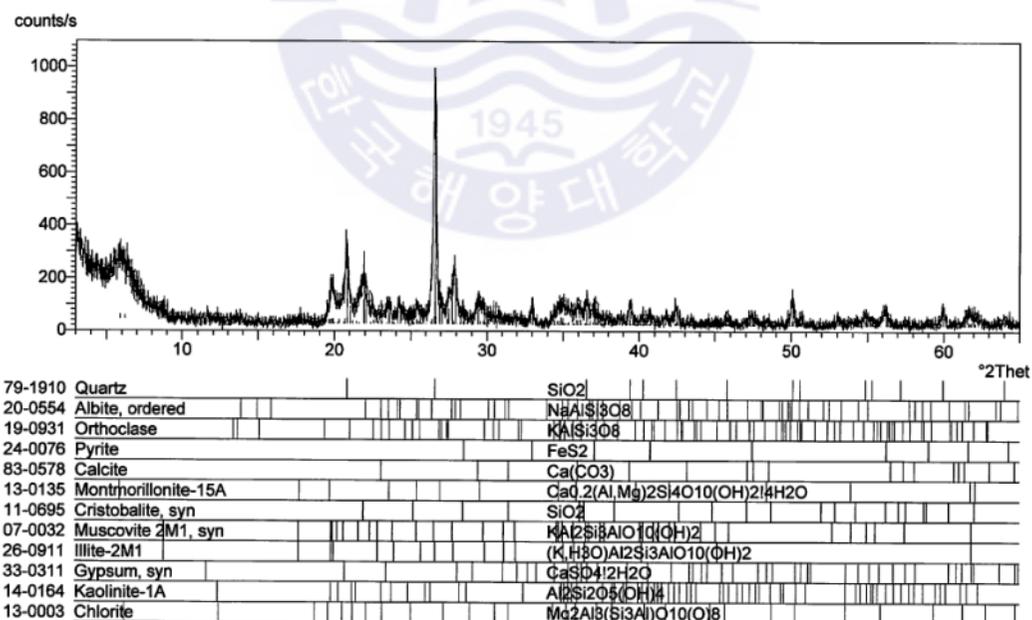


Fig. 4.6 X-ray diffraction patterns of mudstone(EN-R3)

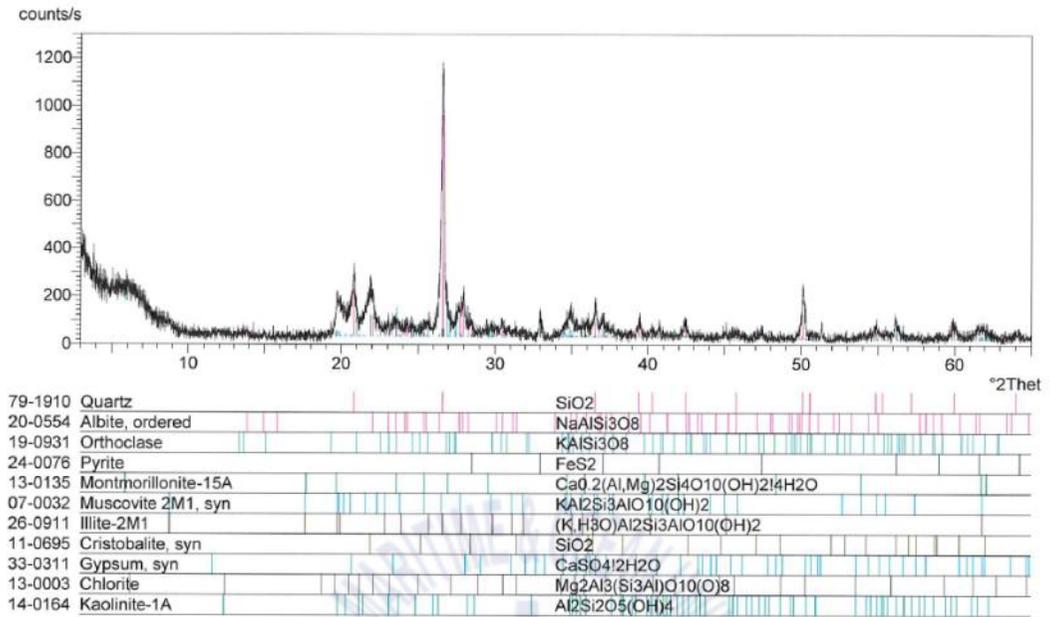


Fig. 4.7 X-ray diffraction patterns of mudstone(EN-R4)

#### 4.1.2 이암의 화학적 분석

##### (1) 증류수 반응

이암 시료를 슬러리 형태로 증류수와 1 : 2 비율로 24시간 반응한 실험 결과는 Table 4.5와 같다. 시료와 증류수 반응 후 안정된 용액의 온도는 26.5°C 이며, pH가 낮을수록 전기전도도(EC)는 높아지는 경향을 확인할 수 있다.

Table 4.5 Analysis results of pH, EC in distilled water conditions

Sample	Temp. (°C)	pH	EC (ms/cm)
EN-R1	26.5	6.93	1.81
EN-R2		7.40	1.72
EN-R3		7.25	1.51
EN-R4		4.09	2.32

실험 결과를 보면 EN-R4 이외의 시료들은 pH 7로 유지되고 있는 반면에, EN-R4는 pH 4까지 낮아진 것으로 측정된다. 이는 이암 시료별 구성 광물에 따라 황철석( $FeS_2$ )의 산화 반응이 다르게 진행되는 것으로 판단된다. 다음으로 전기전도도(EC)를 살펴보면 모든 이암 시료가 순수한 증류수에 비하여 확연하게 높아진 결과 값을 얻을 수 있었다. 따라서 이암의 구성 광물은 증류수와 반응하여 빠른 시간 내에 이온으로 용출되는 것으로 나타났다.

## (2) 양이온 분석

산분해(왕수추출)법으로 전처리를 실시한 이암 시료를 유도 결합 플라즈마 분광 분석기(ICP)로 분석한 결과는 다음의 Table 4.6과 같다. 모든 이암 시료에  $Fe^{2+}$  이온이 높게 측정되어 황철석( $FeS_2$ )으로 다량 존재함을 예측할 수 있기 때문에 산성배수 발생 개연성이 매우 높다고 판단된다. 또한  $Al^{3+}$  이온도 높게 측정되어 산성배수 발생 시  $Fe^{2+}$  이온과 같이 용출되어 황(백)화 현상으로 수질오염의 우려가 크다. 그 외  $Pb$ ,  $As$ ,  $Cr$ ,  $Cd$ 와 같은 중금속이 분석되었는데, 이와 같은 중금속 이온들이 먹는 물 수질기준(제2조 관련, 환경부)의 유해영향 무기물질 위험 수준에 상응하거나 초과하는 것으로 나타났다.

분석 결과를 살펴보면 모든 이암 시료에서  $Ca^{2+}$ 이 최소 20 ppm 이상으로 측정된 것을 볼 수 있는데, 이는 X선 형광분석(XRF)의 분석 결과를 뒷받침해주는 근거로 제 3기 이암의 구성 광물 중에서  $Ca^{2+}$  산화물이 다량 존재하고 있는 것을 뜻한다. 이렇게 중화능력을 갖는 광물이 다량 존재하면 산성배수 발생 시 광물 자체에서 중화반응이 일어나 산성배수가 저감시키는 효과가 있다. 하지만 지점별  $Ca^{2+}$ 의 농도를 살펴보면 EN-R2, EN-R3의 경우에는 EN-R1, EN-R4보다 약 2배 정도로 상당한 차이를 확인할 수 있다. 따라서 제 3기 이암이 존재하는 구간의 공사 진행 시 구간별 제 3기 이암에 대한 정량 분석을 통해  $Fe^{2+}$ 와  $Ca^{2+}$ 의 농도를 정확히 파악한 후, 산성배수 억제 및 발생 저감 기술을 활용할 필요가 있다고 판단된다.

**Table 4.6** Cation analysis result of mudstone

Sample	Al	As	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Si	Zn
	mg/L (ppm)															
EN-R1	61.74	-	22.09	0.01	0.04	0.10	0.11	85.15	10.25	18.43	3.66	1.54	0.15	0.14	0.96	0.58
EN-R2	62.79	-	49.17	-	0.03	0.08	0.09	69.43	8.44	15.07	2.68	1.46	0.12	0.09	1.03	0.40
EN-R3	56.98	0.01	36.58	0.01	0.04	0.07	0.11	76.43	8.29	16.49	2.68	1.32	0.14	0.11	0.98	0.51
EN-R4	62.22	0.01	20.76	-	0.014	0.10	0.11	80.97	10.35	18.29	2.39	1.36	0.16	0.15	1.18	0.52

(3) 음이온 분석

이암 시료로 NAG pH 실험을 실시한 반응 용액으로 희석 과정을 거쳐 이온 크로마토그래피(IC)로 측정된 음이온 분석 값은 Table 4.7과 같다. 7가지 음이온 성분 중 산성배수 발생의 원인이 되는 황산염(Sulfate)을 중점으로 분석해본 결과, 모든 지점의 이암 시료  $SO_4^{2-}$  농도가 먹는 물 수질기준(제2조 관련, 환경부)의 200 mg/L보다 약 2.5배 이상으로 높게 측정되어 상당히 유해한 수준으로 판단할 수 있다.

Table 4.7 Anion analysis result of mudstone

Sample	$F^-$	$Cl^-$	$NO_2^-$	$Br^-$	$PO_4^{3-}$	$NO_3^-$	$SO_4^{2-}$
	mg/L (ppm)						
EN-R1	0.22	0.72	-	0.47	-	0.97	495.10
EN-R2	0.56	0.74	-	1.35	-	1.21	577.00
EN-R3	0.30	0.92	-	0.62	-	2.24	601.30
EN-R4	0.23	1.06	-	-	-	0.89	512.80

### 4.1.3 이암의 산성배수 발생 개연성 평가

#### (1) Total S

Table 4.8은 원소분석기를 이용하여 이암 시료 내의 C, H, N, S의 함량(%)을 분석한 결과이다. 원소 분석은 제 3기 이암 내의 총 황 함량(%)을 구하기 위함이며, 존재하는 황(S)을 모두 황철석 형태로 가정하고 식 (1)을 이용하여 최대 산 발생량(MPA) 계산에 이용된다. 지점별 황 함량은 최대 2배 이상의 차이를 보이지만 대체로 1% 이상으로 산성배수 발생 위험이 높은 것으로 판단된다.

**Table 4.8** Elemental analysis result of mudstone

Sample	weight (mg)	C	H	N	S
		(%)			
EN-R1	28.3	0.7920	23.8662	1.2313	2.7661
EN-R2	59.1	0.2701	3.8695	0.9629	0.9923
EN-R3	66.2	0.2704	3.4086	0.9610	1.2679
EN-R4	60.7	0.2839	3.3652	1.0568	1.6735

#### (2) ANC test

이암 시료 내의 구성 광물이 자체적으로 중화할 수 있는 용량을 실험한 결과를 Table 4.9에 나타내었다. Fizz rating은 각 시료별  $CaCO_3$  광물의 존재 여부를 알 수 있는 실험으로 EN-R2, EN-R3는 8% HCl와 반응하여 기포가 활발하게 발생하였으며, EN-R1, EN-R4는 반응을 육안으로 식별할 수 없는 것으로 나타났다. 모든 단계의 ANC 실험을 실시한 결과 EN-R2, EN-R3는 톤당 평균 53 kg의  $H_2SO_4$ 를 중화할 수 있으며, EN-R1, EN-R4는 톤당 평균 17 kg의  $H_2SO_4$ 를 중화할 수 있다는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 ANC 실험 결과를 토대로 이암 시료에서 산성배수가 동일한 양으로 발생했을 경우에는 EN-R1, EN-R4 지점에서 더 많은 중화제가 요구될 것으로 판단된다.

**Table 4.9** ANC test result of mudstone

Sample	Fizz rating	HCl		pH	NaOH		ANC (kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t)
		M	Vol (mL)		M	Vol (mL)	
EN-R1	0	0.5	4	2.6	0.1	11.15	21.45
EN-R2	2	0.5	20	1.4	0.5	15.2	61.70
EN-R3	2	0.5	20	1.5	0.5	16.5	45.97
EN-R4	0	0.5	4	2.3	0.1	14.45	13.36

- M : Molarity
- Vol : Titrate volume

(3) NAG pH

이암 시료 내 존재하는 황화광물을 강제로 산화시켜 지점별 순 산 발생량은 Table 4.10과 같다. 순 산 발생량이 높을수록 산성배수 발생 개연성이 높은 시료로 판단할 수 있는데, 측정 결과를 보면 EN-R4의 NAG 값이 가장 높게 나왔으며 EN-R1, EN-R3, EN-R2 순으로 순 산 발생량이 높은 결과가 나타났다. 따라서 같은 이암 시료라도 채취 구간별 산성배수 발생량의 큰 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

**Table 4.10** NAG pH test result of mudstone

Sample	weight (g)	NAG pH	NaOH titrated Vol (mL)	NAG (kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t)
EN-R1	1.2507	2.65	6.9	27.03
EN-R2	1.2505	3.91	0.8	2.94
EN-R3	1.2524	2.95	3.6	13.89
EN-R4	1.2496	2.48	9.6	37.64

#### (4) 종합적인 산성배수 발생 평가

앞선 실험을 토대로 제 3기 이암의 산성배수 발생을 종합적으로 평가하기 위해 산출한 결과 값을 Table 4.11에 나타내었다. 안전율(ANC/MPA)은 이암 시료의 산성배수 발생에 대한 상대적 여유를 알려주는 안전지표이다. 안전율 = 1을 기준으로 하여 1보다 높으면 안전, 1보다 낮으면 위험으로 해석할 수 있다. Fig. 4.8을 보면 EN-R1, EN-R4는  $NAPP < 1$  이므로 잠재적 산성배수 발생의 위험이 높으며, EN-R3는  $NAPP > 1$ 이지만 추가적인 정밀 실험 및 재실험이 요구되는 불확실한 경우로 판단되며, EN-R2는  $NAPP > 2$ 이므로 산성배수 발생으로부터 개연성이 낮다고 해석할 수 있다.

Fig. 4.9는 안전율 그래프와 다른 산성배수 발생 평가 방법으로 NAG pH와 NAPP 값을 이용하여 지화학적 분류도 작성을 통해 산성배수 발생 개연성 평가한다. EN-R1, EN-R4는 안전율 평가와 동일하게 PAF로 분류되어 잠재적 산성배수 발생의 개연성이 높은 결과가 나왔지만, EN-R2, EN-R3는 UC로 불확실한 범주로 분류되었다. 이러한 두 분류기준은 산성배수 발생을 과대(소)평가하는 문제를 가지고 있다. 분류기준에 사용된 요소들을 살펴보면, MPA의 경우에는 황을 모두 황철석으로 가정하였으며, ANC는 자연 상태에서 발현하지 않는 중화광물의 중화능도 총량으로 설정되어 있다. 또한 NAG의 경우에도 시료 내 황화광물이 산화되는 과정에 중화광물도 용출되어 반응하는 경우와 순 산 발생량에서  $H_2O_2$  산화로 인해 생성된 유기산이 추가되어 있다. 따라서 수정 및 보완된 지화학적 실험을 실시한 종합적인 평가가 권장된다(KIGAM, 2014).

**Table 4.11** The results of acid base accounting test of the mudstone

Sample	MPA ( $kg H_2SO_4 / t$ )	NAPP (MPA-ANC)	$\frac{ANC}{MPA}$	$\frac{NAG}{NAPP}$	Geochemical classification
EN-R1	84.64	63.19	0.25	0.43	PAF
EN-R2	30.36	-31.34	2.03	-0.09	UC
EN-R3	38.80	-7.18	1.19	-1.93	UC
EN-R4	51.21	37.85	0.26	0.99	PAF

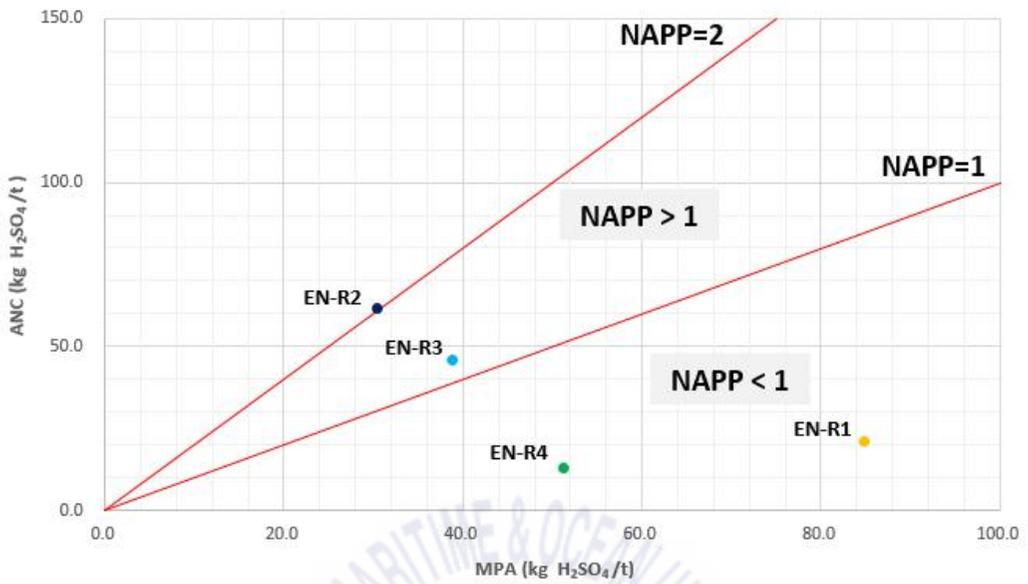


Fig. 4.8 Safety factor graph from ANC/MPA

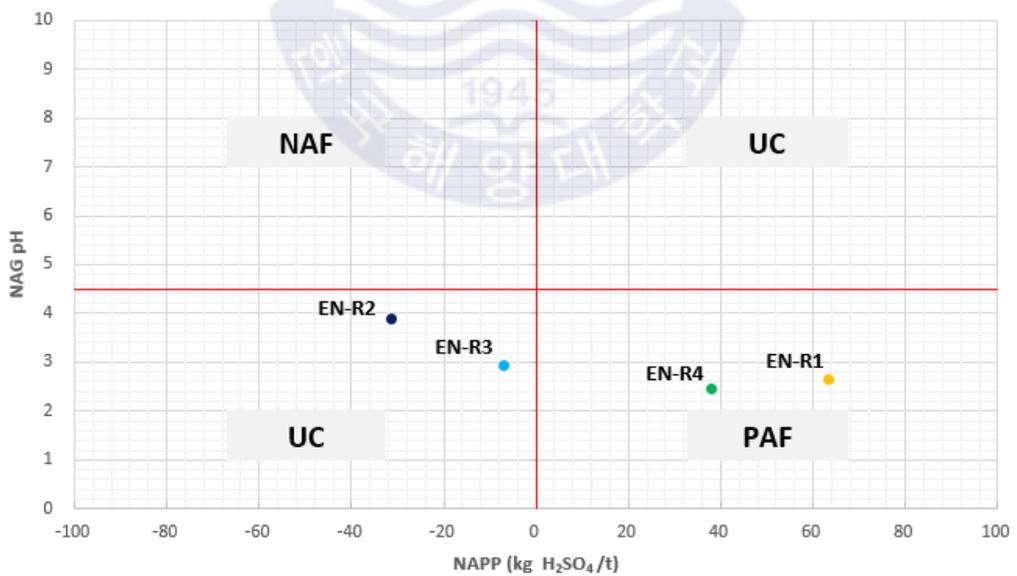


Fig. 4.9 Geochemical classification plot

#### 4.1.4 빗물에 의한 이암의 산성배수 발생속도 예측

제 3기 이암이 빗물과 반응하여 시간 경과에 따른 pH 변화를 나타낸 결과는 Fig. 4.10으로 나타내었다. 지점별 실험 결과를 살펴보면 EN-R1의 무처리 대조군은 빗물반응 30일 후부터 pH가 점차 떨어져 90일 후부터 급격하게 낮아지는 것을 확인할 수 있는데, 이에 비해 코팅제 처리한 실험군은 실험종료까지 pH 7을 유지되면서 소폭 낮아졌다. 산 중화량이 가장 높았던 EN-R2는 150일 동안 실험군과 대조군 모두 pH 변동이 크게 없어 빗물에 의한 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. EN-R3 역시 산 중화량이 비교적 높았지만, 빗물반응 140일 이후에는 모든 실험군과 대조군의 pH가 점차 낮아지는 현상이 보이므로 높은 pH 조건에서는 코팅제 피막 형성이 어려운 조건으로 사료된다. EN-R4는 산 중화량이 가장 낮은 반면에 순 산 발생량이 가장 높은 시료로 무처리 대조군은 실험 시작일로부터 pH가 급격하게 낮아져 빗물반응 50일 이후부터 pH 3 정도로 유지되는 것을 확인할 수 있으며, 3mL 코팅제 처리한 실험군은 빗물반응 140일까지 pH 6을 유지하고 있으며, 1mL 코팅제 처리한 실험군 빗물반응 30일 이후부터 pH가 점점 하락하는 경향이 보이는데, 대조군과 비교해보면 코팅제 효과가 효율적으로 발휘하는 것으로 판단된다.

이 결과를 토대로 정리해 볼 때, 산성배수 억제를 위한 코팅제 처리효과를 입증할 수 있었으며, 최대 산 발생량(MPA)이 높은 시료일수록 많은 양의 코팅제 처리가 필요하다는 것을 확인하였다. 그리고 EN-R3와 EN-R4를 비교해볼 때, 코팅제 피막 형성은 낮은 pH 조건에서 더 효과적으로 발휘하는 것으로 나타났다. 또한 이 실험과 앞선 ABA test를 종합하여 판단해보면 최대 산 발생량(MPA)보다 산 중화량(ANC)이 산성배수 발생 여부 판단에 더 밀접한 관계가 있는 것을 알 수 있다. 제 3기 이암의 산성배수 발생속도에 대한 정확한 예측은 불가능하지만, 실험 결과를 통해 산 중화량이 적은 시료일수록 산성배수가 빠르게 발생하는 것이 확인되었으므로 이를 토대로 추가적인 향후 방지 대책과 정량적 수치에 관한 연구가 필요하다고 판단된다.

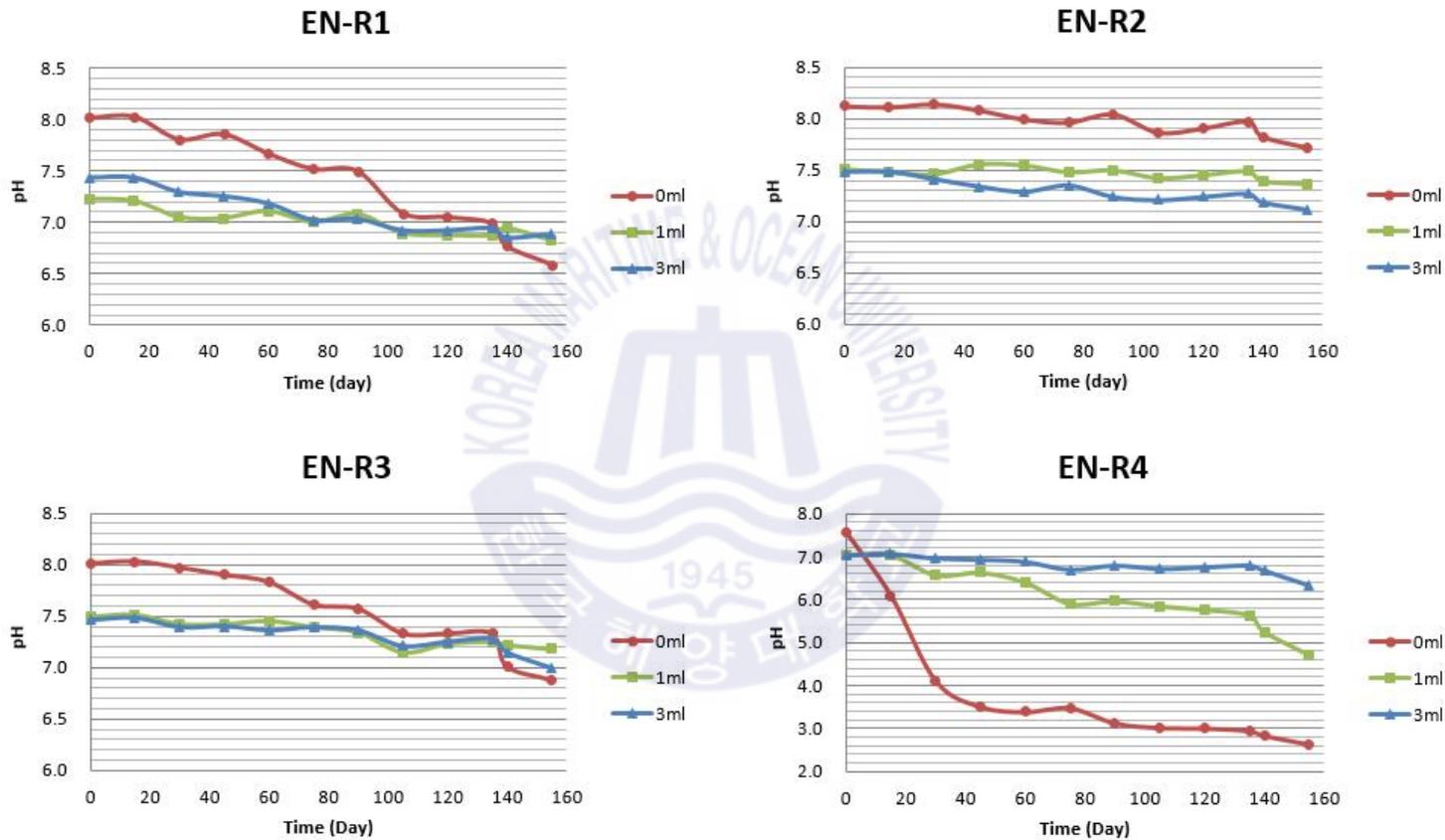


Fig. 4.10 Changing pH of acid rock by rainwater

#### 4.1.5 복합슬래그 성분 및 중화능력 분석

##### (1) 복합슬래그 성분 분석

복합슬래그의 입도분포는 Table 4.12와 같이 측정되었으며, 통일분류법으로 분류한 결과 GP(입도가 불량한 자갈)로 분류되었다. X선 형광분석시험과 회절 분석시험 결과는 Table 4.13과 Fig. 4.11로 나타났다. XRF 분석 결과를 보면 일반적인 암석에서 많은 비중을 차지하는  $SiO_2$  성분이 18.05%로 낮게 측정된 반면,  $Fe_2O_3$ 과  $CaO$ 가 높게 측정되는 것으로 나타났다. 이는 제철소에서 생성된 슬래그이기 때문에 금속 산화물이 비교적 높게 측정된 것으로 보이며, 그중  $CaO$  함량이 상당히 높으므로 중화제로 사용 가능할 것으로 판단된다. XRD 분석 그래프를 보면 황장석, 인회석, 감람석, 산화철 결합물들이 측정되었는데, 염기성 물질로 구성된  $Ca$ -결합물로 구성된 광물 비율이 높은 것을 알 수 있다.

**Table 4.12** Grain-size distribution of the MS-25

Sieve (mm)	Percent of passing weight (%)						
	< 26.5	< 19.0	< 9.5	< 4.75	< 2.36	< 1.18	< 0.075
MS-25	100	98.4	31.7	4.4	2.6	2.1	0.5
	$G_s$	$C_u$	$C_g$	LL (%)	PL (%)	U.S.C.S	
	2.551	2.17	0.24	NP	NP	GP	

- NP : Not-Plastic

**Table 4.13** XRF analysis results of the MS-25

Component	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$K_2O$
MS-25	18.05	4.76	31.90	35.18	4.39	0.13
	$Na_2O$	$TiO_2$	$MnO$	$P_2O_5$	$Igloss$	
	0.11	0.54	2.01	1.48	-4.27	

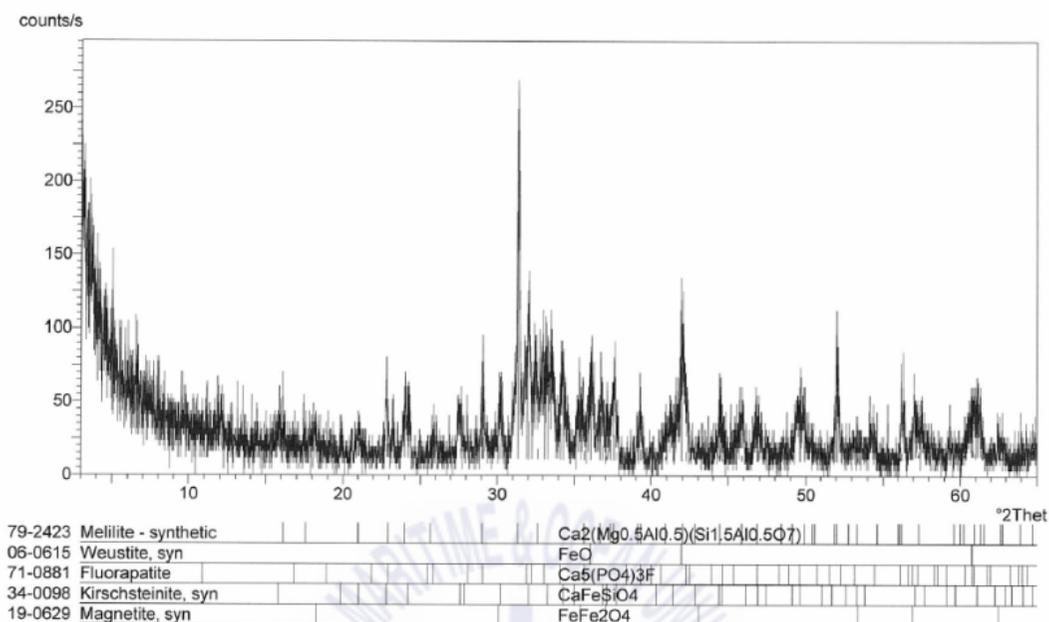


Fig. 4.11 X-ray diffraction patterns of the MS-25

산분해(왕수추출)법으로 전처리를 실시한 복합슬래그를 유도 결합 플라즈마 분광 분석기(ICP)로 분석한 결과는 Table 4.14와 같다. 복합슬래그의 측정값을 보면 중금속 중 Cr 이온이 0.35 ppm으로 미량 검출되었으며, 제철소의 슬래그 특성상  $Fe^{2+}$  농도가 65.09 ppm으로 높으며,  $Ca^{2+}$ 가 60.50 ppm으로 다량 포함되어 있어 중화제로 적합한 것으로 판단된다.

Table 4.14 Cation analysis result of the MS-25

Sample	Al	As	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe
	mg/L (ppm)							
MS-25	8.75	-	60.50	-	-	0.35	-	65.09
	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Si	Zn
	mg/L (ppm)							
	0.41	7.05	4.17	0.27	-	-	-	-

(2) 복합슬래그 중화능력 분석

최대 산 발생량(MPA)과 산 중화량(ANC)의 관계식을 이용하여 복합슬래그의 중화능력을 분석한 결과는 Table 4.15와 같다. 순수한 석회석( $CaCO_3$ )의 산 중화량을 기준으로 설정하여 분석한 복합슬래그의 산 중화량 값은 693.9로 산출되었으며, 중화반응 관계식을 통해 1% 황 함량을 중화시키기 위한 복합슬래그 첨가량은 4.5%로 계산되었다. 계산된 비율을 적용하여 Table 4.16과 같이 지점별 이암 시료에 대한 복합슬래그의 첨가량을 계산을 통해 7.54%의 평균적인 복합슬래그 첨가량(%)이 산출되었다.

Table 4.15 Correlation of material

Sample	ANC (kg $CaCO_3$ /t)	Correlation (%)		
		S : $CaCO_3$	$CaCO_3$ : MS-25	S : MS-25
$CaCO_3$	1000.0	1 : 3.125	1 : 0.694	1 : 4.5
MS-25	693.9			

Table 4.16 Required MS-25 rate by sulfur

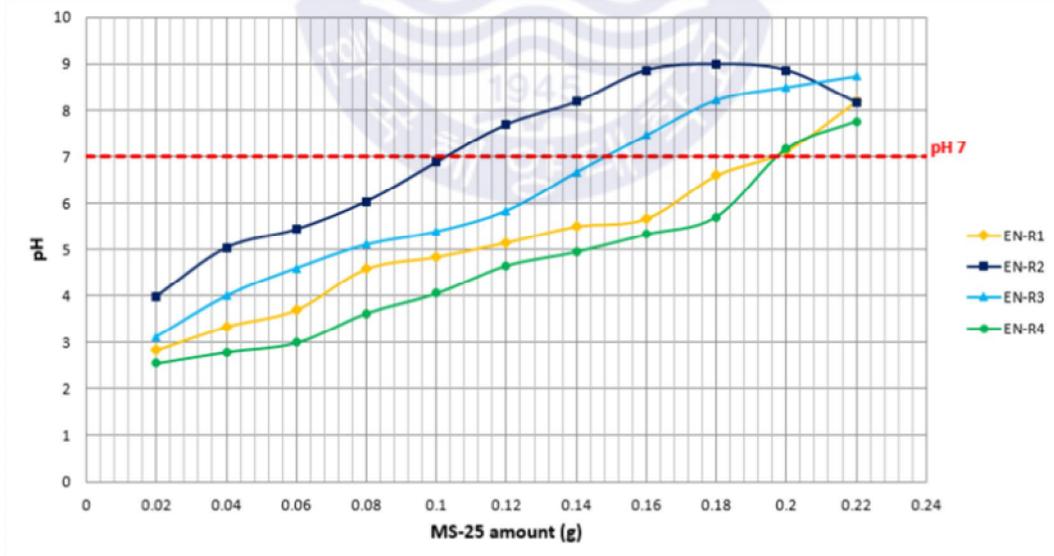
Sample	S	MS-25	Aver. MS-25
	(%)		
EN-R1	2.7661	12.45	7.54
EN-R2	0.9923	4.47	
EN-R3	1.2679	5.71	
EN-R4	1.6735	7.53	

중화능력을 확인하기 위한 다른 실험 방법으로 NAG pH를 실시한 이암 시료에 복합슬래그를 주기적으로 미량 첨가한 시험 결과는 Table 4.17과 같다. 측정값을 그래프로 정리해놓은 Fig. 4.12를 보면 모든 시료가 pH 7로 중화되기까지

복합슬래그는 평균적으로 0.161 g의 첨가량이 필요하였다. 이를 관계식에 대입하여 평균 황 함량(g)에 대한 복합슬래그의 첨가량(g)의 비율은 1 : 7.67로 산출되었다. 중량에 의한 실험과 앞선 백분율에 의한 실험의 결과가 동일한 비율을 얻어 황 함량에 대한 복합슬래그의 중화량이 검증되었기 때문에 배합설계 시 제 3기 이암의 중화능력에 따른 정량적인 복합슬래그의 첨가량 산출이 가능할 것으로 판단된다.

**Table 4.17** Required MS-25 amount by sulfur

Sample	Weight (g)	Initial pH	S (g) in weight	Aver. S (g)	MS-25 (g) to pH 7	Aver. MS-25 (g)
EN-R1	1.2503	2.83	0.036	0.021	0.196	0.161
EN-R2	1.2511	3.99	0.012		0.104	
EN-R3	1.2517	3.13	0.016		0.148	
EN-R4	1.2514	2.56	0.021		0.196	



**Fig. 4.12** Changing pH by addition of MS-25

#### 4.1.6 개량재를 이용한 배합설계 선정

##### (1) 물성시험 결과

제 3기 이암에 복합슬래그와 중화·코팅제의 비율을 다른 조건으로 혼합하여 배합설계를 실시한 물성시험 결과는 Table 4.18과 같다. 비중( $G_s$ )은 배합별 차이가 크게 나타나지 않았으며, 액·소성한계시험에서 이암 100%의 경우는 액성한계(LL) 66.6%, 소성한계(PI) 41.7%로 고속도로 건설재료 품질기준(2016)의 성토재 일반기준인  $LL < 50$ ,  $PI < 25$ 를 충족하지 못하였으며, 다른 혼합토의 경우에는 시험 방법 및 장비의 조건에 적합하지 않기 때문에 비소성(NP)로 판정하였다. 통일분류법(U.S.C.S)에 의한 분류 결과는 슬래그 함량 0%, 10%일 경우 압축성이 큰 점토(CH)로 분류되었으며 슬래그 함량 20%의 경우에는 점토질 모래(SC)로 분류되었다. 결과적으로 슬래그 함량이 증가함에 따라 이암이 치환됨으로써 입도가 고른 양질의 토사로 바뀌는 것으로 해석할 수 있다.

**Table 4.18** Results of physical test on samples with different mixtures

No.	Case	$G_s$	LL (%)	PI (%)	U.S.C.S
1	EN-R (100%)	2.688	66.6	41.7	CH
2	EN-R (100%) + NCA	2.691	NP	NP	CH
3	EN-R (90%) + MS-25 (10%)	2.686	NP	NP	CH
4	EN-R (90%) + MS-25 (10%) + NCA	2.679	NP	NP	CH
5	EN-R (80%) + MS-25 (20%)	2.672	NP	NP	SC
6	EN-R (80%) + MS-25 (20%) + NCA	2.674	NP	NP	SC

- EN-R : Mudstone.
- MS-25 : Complex mill slag.
- NCA : Neutralizing and Coating Agent
- NP : Non-Plastic

(2) 역학시험 결과

제 3기 이암에 복합슬래그와 중화·코팅제 처리를 비율별로 혼합하여 배합설계를 실시한 역학시험 결과는 Table 4.19와 같으며, Fig. 4.13은 배합설계별 다짐시험 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 최대건조밀도( $\gamma_{dmax}$ )은 No. 4의 슬래그 함량 10%와 중화·코팅제 처리한 조건부터 No. 6까지 1.5 t/m<sup>3</sup>를 초과하여 성토재 일반기준에 충족되는 것을 확인할 수 있었다. 최적함수비(O.M.C)는 복합슬래그와 중화·코팅제를 처리함으로써 점차 낮아지는데, 이러한 변화는 건조 측 다짐곡선이 만들어지는 현상으로 전단강도가 높아지고 흙의 압축성이 낮아져 투수계수가 감소하는 것을 의미한다. 다음으로 일축압축강도( $q_u$ )의 시험 결과를 보면 이암 100%일 때 가장 큰 압축강도가 나타났고, 배합조건 No. 3, No. 5와 같이 슬래그만 혼합 시 일축압축강도가 크게 떨어졌으며, 배합조건 No. 4와 No. 6과 같이 동일한 슬래그 함량에 중화·코팅제를 처리할 경우에 처리하지 않은 조건보다 일축압축강도가 각각 16.5 kPa, 218.4 kPa씩 높아지는 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 중화·코팅제 처리는 이암 입자와 슬래그 간의 간극을 감소시켜 입자 간의 결합을 강하게 유지해 주는 것으로 판단된다.

**Table 4.19** Results of mechanical test on samples with different mixtures

No.	Case	$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	O.M.C	$q_u$ (kPa)
1	EN-R (100%)	1.440	23.7	972.8
2	EN-R (100%) + NA	1.478	22.7	632.5
3	EN-R (90%) + MS-25 (10%)	1.472	22.3	547.8
4	EN-R (90%) + MS-25 (10%) + NA	1.534	19.6	564.3
5	EN-R (80%) + MS-25 (20%)	1.580	18.7	449.7
6	EN-R (80%) + MS-25 (20%) + NA	1.647	18.3	668.1

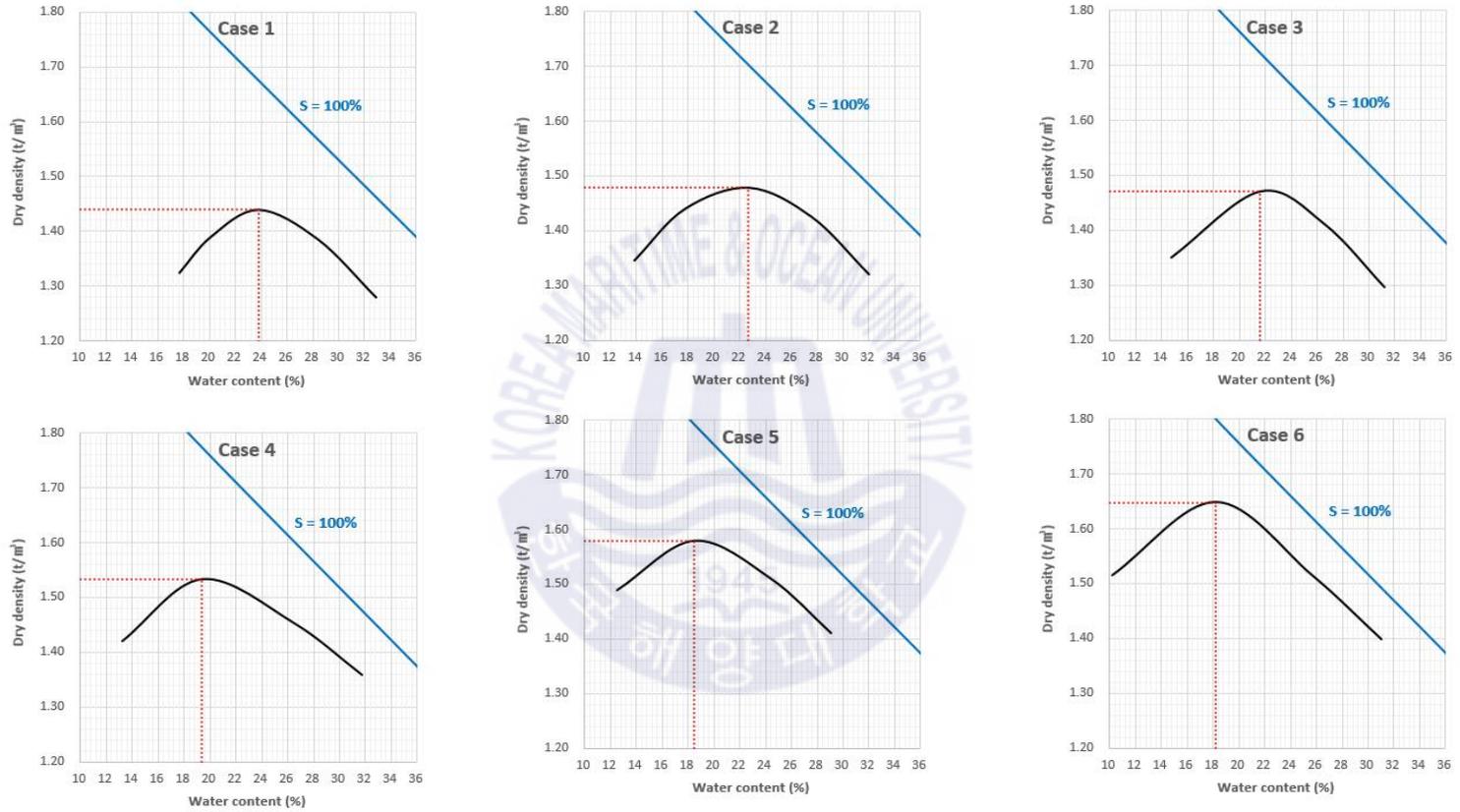


Fig. 4.13 Results graph of compaction test on samples with different mixtures

### (3) 배합설계

배합조건에 따른 역학시험 결과를 Fig. 4.14에 종합하여 나타내었다. 고속도로 건설재료 품질기준(2016)과 비교해보면 최대건조밀도( $\gamma_{dmax}$ )가  $1.5 \text{ t/m}^3$  이상인 조건은 No. 4, 5, 6으로 나타났으며, 모든 배합조건이 일축압축강도가 300 kPa를 초과하였다. 이 결과 값은 지반개량에 관한 실무 매뉴얼로 많이 사용되는 시멘트계 개량재에 의한 지반개량 매뉴얼(社団法人日本セメント協会, 2012)에서 권장하는 개량 후의 일축압축강도 설계강도 100 ~ 300 kPa에 충족되는 것으로 나타났다. 이렇게 배합설계 조건이 고속도로 건설재료 품질기준에 충족되는 이유를 정리해보면 다음과 같다. 제 3기 이암에 복합슬래그를 혼합하면 입도분포가 조립질로 개선되어 최대건조밀도 증가와 최적함수비가 감소하며, 중화·코팅제 처리를 통해 복합슬래그의 산화 피막이 제거되어 석회질 성분이 용출됨에 따라 잠재수경성이 발현하여 강도가 증가하는 것으로 해석할 수 있다. 최적의 배합설계는 성토재의 일반기준을 충족한 조건 No. 4, 5, 6 중에서 슬래그 함량이 낮고 일축압축강도 발현이 높은 No. 4(이암 90% + 슬래그 10% + 중화·코팅제처리)가 가장 경제적이면서 역학적 특성도 적합하다고 판단된다.

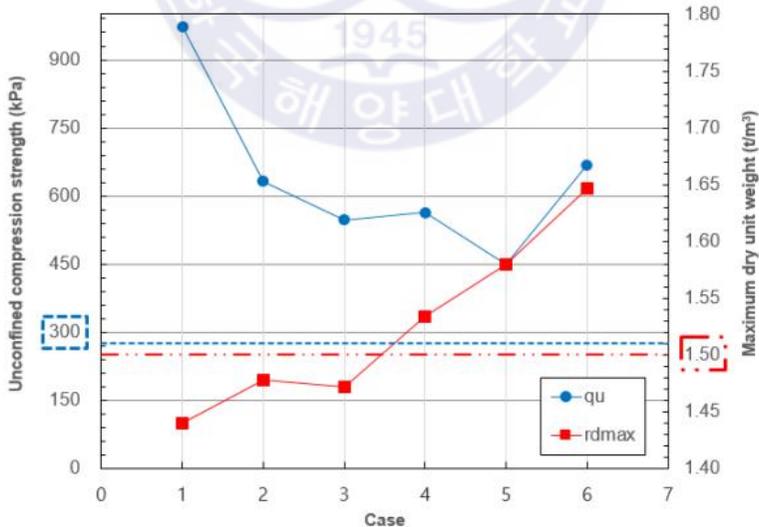


Fig. 4.14 Overall results of mechanical test

위의 역학적 특성 시험 결과를 토대로 하여 화학적 특성도 고려한 배합설계 조건을 알아보기 위해서 Table 4.20과 같이 황 함량과 복합슬래그 첨가량의 상관관계를 제시하였다. 앞서 산성배수 발생 억제를 위해 제 3기 이암 내 포함된 황 함량에 따른 복합슬래그의 첨가량에 대한 중량비와 백분율 비의 결과 값을 평균하여 1 : 7.61로 비율을 정하였으며, 여기에 건설공사 비탈면 설계기준 (2016)의 연약지반의 쌓기 비탈면 안정해석 시 적용하는 최소 안전율(FS) 1.3을 복합슬래그에 적용해서 1 : 9.89 비율의 배합설계조건을 도출할 수 있었다.

**Table 4.20** Correlation ratio of S : MS-25

Sample	Weight ratio		Volume ratio		Final ratio		Safety factor ratio	
	(g)				(%)			
	S : MS-25		S : MS-25		S : MS-25		S : MS-25	
EN-R1	1	7.67	1	7.54	1	7.61	1	9.89
EN-R2								
EN-R3								
EN-R4								

최종적으로 역학적·화학적 특성을 모두 충족시킬 뿐 아니라 순성토량을 낮춤으로써 제 3기 이암에 복합슬래그를 최소량으로 치환하여 경제적으로 활용할 수 있는 배합설계 No. 4(이암 90% + 복합슬래그 10% + 중화·코팅제처리)를 현장시험 성토구조체 배합설계조건으로 최종 채택하였다.

## 4.2 성토구조체 시공

### 4.2.1 성토구조체 시공과정

제 3기 이암으로 성토한 구조체는 Fig. 4.15에 작성된 횡단면도와 시공순서도를 준수하여 경상북도 포항시 북구 흥해읍 성곡리에 소재한 한국지질자원연구원(포항분원)에 시공하였다. 시공기간은 2018월 4월 23일부터 시작하여 약 2주 간에 걸쳐서 성토공사 및 식생피복 작업을 진행하였다(Fig. 4.16).

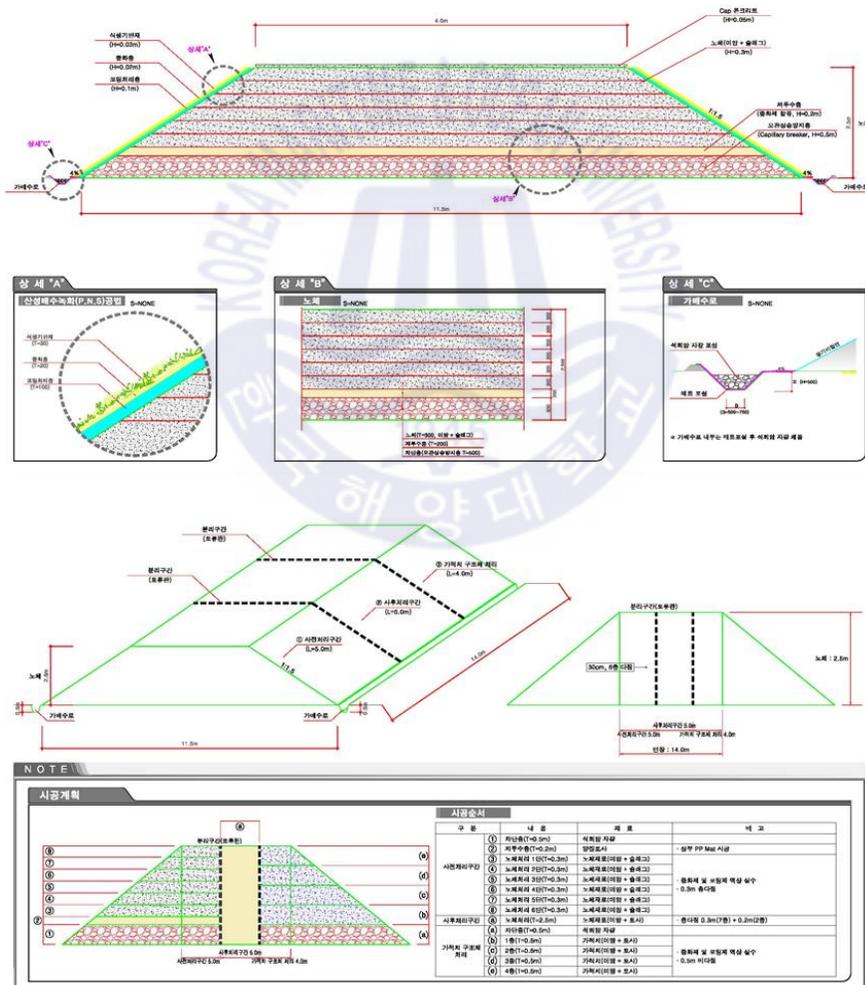


Fig. 4.15 Cross section and construction flowchart of banking structure



1. Section separation by wooden plate



5. Field density test



2. Stack the blocking and permeable layer



6. Plate load test



3. Measurement sensor installation



7. Monitoring measure system installation



4. Banking and vibration compact



8. Construction completed

Fig. 4.16 Photos of construction processes of banking structure

## 4.2.2 설계기준 평가 및 적정성 검토

### (1) 현장밀도시험 결과

성토구조체의 사전·사후처리구간의 각 성토 높이별 최적함수비와 상대다짐도 결과는 Table 4.21과 같다. 현장 함수비(%)의 경우, 사전처리구간에서는 최적함수비 19.6%와 근사한 결과 값을 나타냈으며, 무처리구간으로 설계된 사후처리구간은 높은 현장 함수비가 측정되어 흡수팽창현상의 위험이 높은 것으로 판단된다. 상대다짐도(%)는 현장시험을 진행한 모든 구간에서 도로공사 노체의 다짐도 기준인 90%를 초과하는 것으로 나타나 충분한 현장 다짐이 시행된 것을 확인할 수 있다(Fig. 4.17). 제 3기 이암의 공학적 특성을 고려해볼 때, 사전처리구간은 배합설계의 효과를 확인할 수 있었으며, 사후처리구간은 다짐 직후의 노체 다짐도 기준은 충족시켰지만, 높은 현장 함수비로 인해 차후의 문제 발생의 여지가 다분하기 때문에 성토재로서 부적합하다고 판단된다.

Table 4.21 Results of field density test

<i>Pre-processing section</i>					
Level (m)	Field test		Laboratory test		Relative compaction (%)
	w (%)	$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	O.M.C (%)	$\gamma_{d\max}$ (t/m <sup>3</sup> )	
1.3	19.9	1.453	19.6	1.534	94.7
1.9	20.0	1.477			96.3
2.5	20.5	1.421			92.6
<i>Post-processing section</i>					
Level (m)	Field test		Laboratory test		Relative compaction (%)
	w (%)	$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	O.M.C (%)	$\gamma_{d\max}$ (t/m <sup>3</sup> )	
0.6	29.5	1.302	23.7	1.440	90.4
1.2	25.9	1.306			90.7
1.8	27.6	1.309			90.9
2.5	20.6	1.394			96.8

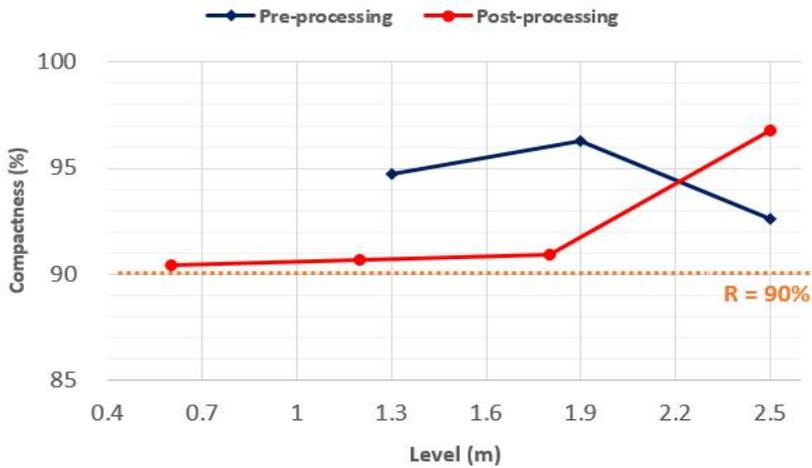


Fig. 4.17 Relative compaction graph by section

(2) 평판재하시험 결과

성토구조체의 사전·사후처리구간의 지반반력계수( $K_{30}$ )는 Table 4.22와 같이 측정되었다. 현장시험을 실시한 두 구간 모두 한국도로공사 아스팔트 포장기준  $150 \text{ MN/m}^3$  이상의 충족된 결과를 얻었다. 따라서 시공 직후에는 조건별 처리구간과 상관없이 제 3기 이암이 노체의 성토재로 사용 가능함을 확인할 수 있었다(Fig. 4.18).

Table 4.22 Results of plate bearing test

Case	level (m)	Settlement (cm)	Load strength ( $\text{kN/m}^2$ )	Subgrade reaction modulus	
				$K_{30}$	Standard $K_{30}$
				(MN/m <sup>3</sup> )	
Pre-processing section	1.3	0.25	432	172.8	> 150
	1.9		565	226.0	
Post-processing section	1.2		690	276.0	

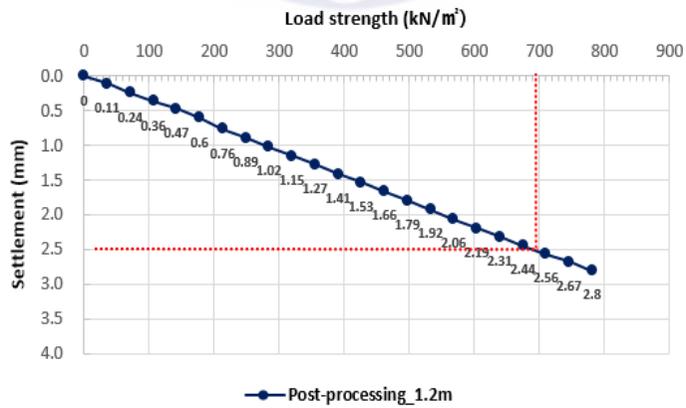
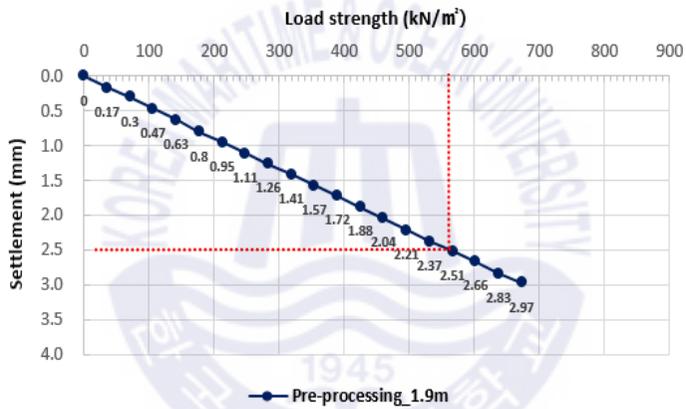
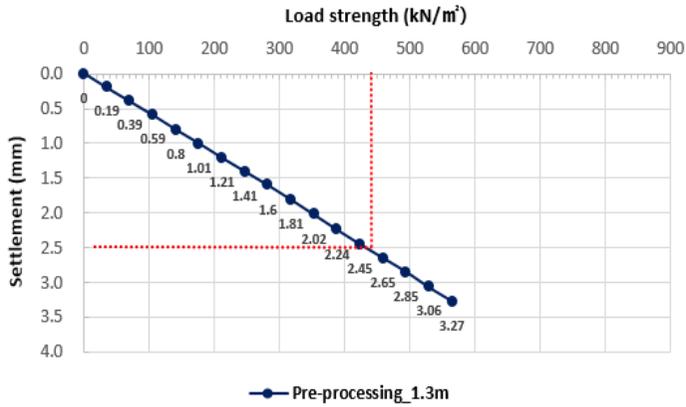


Fig. 4.18 Measurement results graph of plate bearing test

### 3) 투수계수시험 결과

성토구조체의 처리구간별 변수위 삼축투수시험 결과는 Table 4.23과 같다. 일반적으로 사용되는 투수계수에 의한 분류에서는 전 구간이 실트로 분류되었으며, 흙의 종류에 따른 투수계수 분류방법(Powers, 1992)을 참고하여 분류한 결과, 사전처리구간과 가척치구간은 실트질 모래(SM)로 분류되었으며, 사후처리구간은 입도가 양호한 모래(SW)로 분류되었다. 투수계수는 사후처리구간이 가장 크게 나타났으며, 가척치구간, 사전처리구간 순으로 높은 투수계수 값이 측정되었다. 이러한 결과는 이암 입자 사이의 간극이 중화·코팅제에 의해 채워졌거나 중화·코팅제가 복합슬래그의 잠재수경성을 발현시켜 경화 반응이 일어나 C-S-H계 수화물이 형성되어 간극이 감소한 것으로 판단할 수 있다.

Table 4.23 Results of triaxial permeability coefficient test

Case	Pre-processing section	Post-processing section	Temporary-stacking section
	(cm/sec)		
Coefficient of permeability	$2.0 \times 10^{-5}$	$3.24 \times 10^{-4}$	$2.64 \times 10^{-5}$
	$2.1 \times 10^{-5}$	$3.3 \times 10^{-4}$	$2.43 \times 10^{-5}$
U.S.C.S	SM	SW	SM

### 4.3 성토구조체 모니터링 계측 데이터 해석

본 연구에 활용된 모니터링 계측 자료는 계측시스템 설치 일자인 2018년 6월 22일부터 약 6개월간 수집한 자료이다. 2019년 2월 이후에 측정한 자료들은 사전처리구간의 침하 계측센서 고장으로 인하여 모든 계측센서에 영향을 끼쳐 계측 자료에 심각한 오류가 발생하였다. 하지만 문제를 해결하기 위한 종합적인 조치 일정과 차후에 사후처리구간의 중화제 주입시공 계획이 겹치는 관계로 더는 추가적인 자료 수집이 어렵다고 판단하였다. 따라서 2019년 2월까지의 성토구조체 계측 값들을 활용하여 연구 결과를 작성하였다.

### 4.3.1 pH

성토구조체의 각 처리구간별 pH 변화는 Fig. 4.19와 같다. 먼저 사전처리구간을 살펴보면 계측 시작 이후에 총 강우량이 많았던 2018년 7월을 제외하고 pH 6 내외로 안정하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 사후처리구간의 경우에는 강우의 영향을 받지 않는 계측 양상으로 pH 5 내외로 유지되었지만, 2019년 1월부터 pH가 점차 낮아지는 경향을 확인할 수 있었다. 가적치구간은 초기에 pH 6으로 시작하여 강우량의 증가함에 따라 pH가 급격하게 높아져 강알칼리 환경으로 변화되는 것을 확인할 수 있었다. pH 계측 자료를 통한 종합적인 결론으로 사전·사후처리구간은 도로설계기준으로 다짐 작업을 진행했기 때문에 강우의 침투가 원활하지 않은 것으로 판단되며, 사전처리구간은 pH 6으로 유지되어 배합설계의 효과를 확인할 수 있었다. 하지만 사후처리구간은 pH가 점차 낮아지기 시작하므로 제 3기 이암의 화학적 특성 문제 중 하나인 산성배수가 발생하는 양상이 보이므로 독립적으로 성토재 사용이 어렵다고 판단된다. 가적치구간은 pH 12 이상으로 예상치를 뛰어넘는 수치로 계측되어 적치 기간에 따른 중화·코팅제의 처리량을 정확하게 산정할 수 있는 기술이 요구된다.

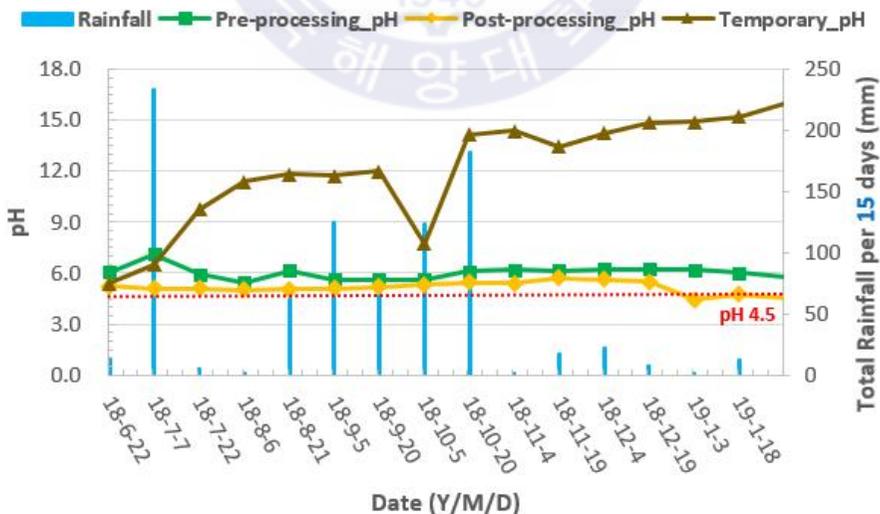


Fig. 4.19 Measurement results of pH from banking structure

### 4.3.2 함수량

성토구조체 구간 중에서 사전처리구간의 상·하층부에 대한 함수량 측정 결과는 Fig. 4.20과 같다. 사전처리구간의 상층부의 초기 함수량은 18.35%로 측정되었으며, 강우의 영향을 받지 않고 별다른 변화추이 없이 함수량이 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 하층부의 경우 초기 함수량은 21.96%로 측정되었는데, 2019년 7월을 기점으로 하여 점차 낮아지는 경향이 나타났으며, 자료 측정 후반에는 함수량이 6% 정도로 측정되었다. 측정된 결과를 해석해보면 상층부에서는 중화·코팅제처리에 의해 복합슬래그의 잠재수경성이 발현되어 입자 간의 경화반응으로 C-S-H계 수화물이 생겨 유선이 차단된 것으로 판단되며, 하층부의 경우에는 노체 밑 부분이 저투수층으로 포설되어 있기 때문에 일반적인 중력배수의 흐름을 보이는 것으로 판단된다. 예외적인 경우로 사전처리구간에서 중력배수의 영향을 받는 산성배수가 발생하더라도 최하단부에 석회석 자갈로 이루어진 중화·차단층이 존재하기 때문에 외부로 유출 시 중화 과정을 거쳐 유출된다. 따라서 사전처리구간의 배합설계는 적합성이 우수하다고 판단할 수 있다.

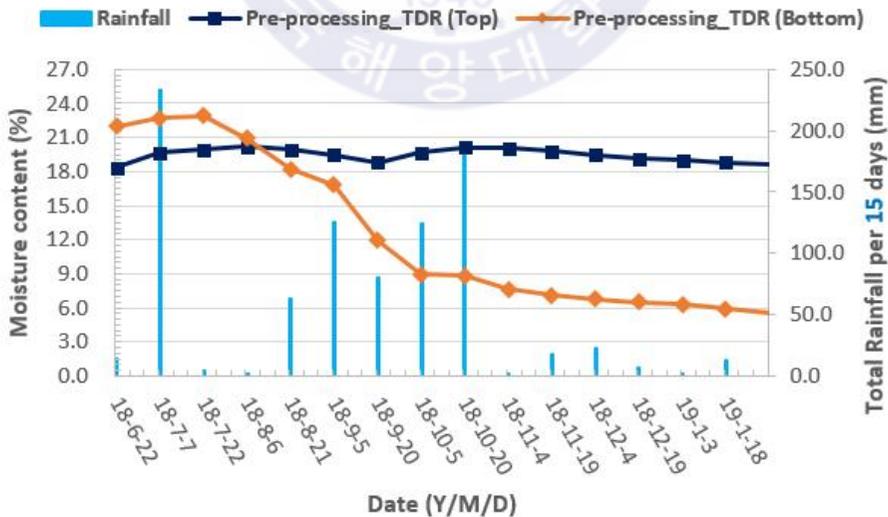


Fig. 4.20 Measurement results of moisture content from pre-processing section

다음으로 사후처리구간의 상·하층부에 대한 함수량 계측 결과는 Fig. 4.21과 같다. 상층부의 초기 함수량은 22.5%로 계측되었지만 중력배수의 영향으로 점차 감소하는 경향을 보인다. 하층부의 초기 함수량은 20.13%인데 시간이 경과함에 따라 총 함수량이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 강우의 영향과 상층부의 중력배수에 의한 영향으로 확인되며, 계측을 지속함에 따라서 2018년 10월의 함수량이 48%까지 증가하여 제 3기 이암이 과포화된 상태로 판단된다. 이후에는 과잉간극수압에 의해 수분이 급격하게 배수되어 30% 내외로 함수량이 감소하고, 비교적 안정된 양상을 보이는 것으로 판단된다.

무처리로 시공된 사후처리구간은 산성배수 발생 개연성이 높으므로 계측 그래프와 같이 강수량이 많아지면 중력배수의 흐름에 의해 중화처리가 되지 않은 산성배수가 외부로 유출될 가능성이 매우 높다. 또한 성토기준에 적합하게 시공된 성토구조체이지만 급격한 함수량 변화로 인해 슬레이킹 현상이나 지반침하의 우려가 크므로, 성토재로써 독립적인 제 3기 이암의 활용을 자제해야 하며, 이를 해결할 방안을 강구해야 한다고 판단된다.

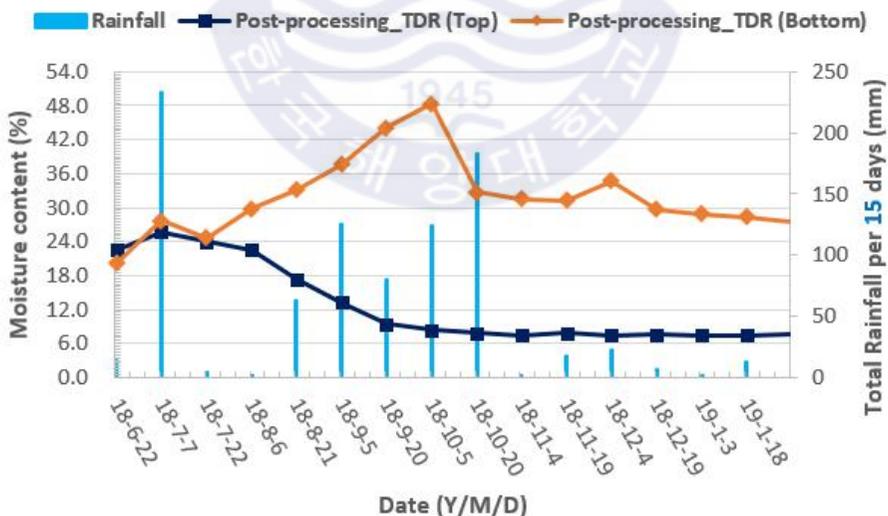


Fig. 4.21 Measurement results of moisture content from post-processing section

### 4.3.3 침하량

성토구조체의 사전·사후처리구간의 침하량 측정 결과는 Fig. 4.22와 같다. 사전처리구간의 초·중반 침하량의 경우, 사후처리구간에 비해 비교적 빠르게 침하가 진행되는 것을 볼 수 있다. 하지만 시간이 경과함에 따라 사후처리구간의 침하가 급격히 증가하여 최종 측정 침하량은 17.49 mm이며, 사전처리구간의 침하는 급변 없이 서서히 진행되어 최종 측정 침하량이 15.72 mm로 측정되었다.

측정 자료를 보면 음의 침하량이 측정되는데, 이는 측측기가 부동액의 액상 높이차에 의한 측정 원리로 발생하는 오차로 판단되며, 성토 시 살수에 의한 제 3기 이암의 흡수팽창의 원인으로 볼 수 있다. 또한 사전처리구간이 침하가 먼저 진행된 이유는 세 개의 비탈면으로 구성된 가장자리에 위치하고 있기 때문으로 사료된다. 측정 그래프상 두 구간 모두 강수의 영향은 없는 것으로 보이며, 현재까지의 구간별 침하량은 도로설계편람 토공 및 배수편(2012) 내 한국 도로공사가 도로에 적용하는 허용 침하량 10 cm를 초과하지 않는 것으로 확인되었다. 하지만 제 3기 이암은 점토질 성분으로 이루어져 있기 때문에 충분한 압밀침하 소요 시간과 잔류침하량에 대한 고려가 필요하다고 판단된다.

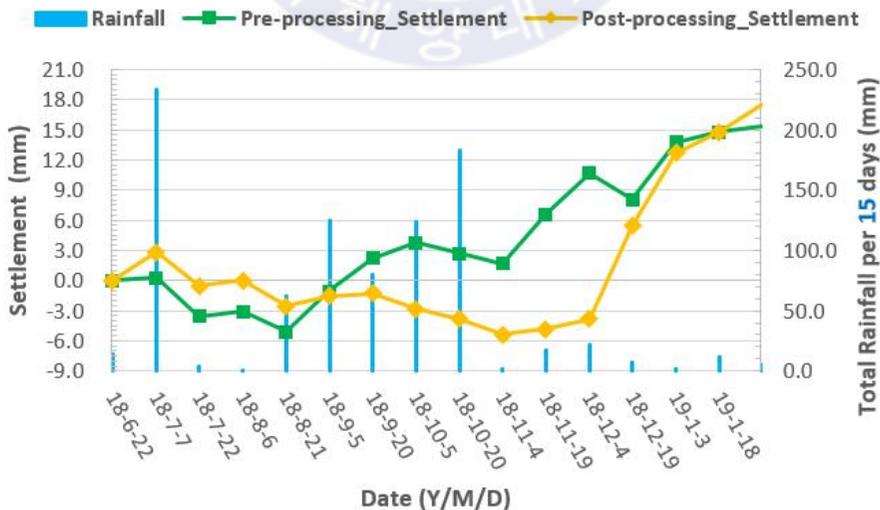


Fig. 4.22 Measurement results of settlement from banking structure

#### 4.4 성토구조체의 구간별 실증시험 결과

성토구조체를 시공한 지 약 12개월 후, 2019년 4월 22일부터 26일까지 5일간에 걸쳐 사후처리구간의 중화·코팅제 주입시공을 진행하였으며, 10일 뒤 처리구간별 실증시험에 대한 지속효과 및 현 상태를 파악하기 위해 구간의 단면굴착을 실시하여 중화·코팅제 처리능력을 평가하였다.

##### 4.4.1 사전처리구간

사전처리구간의 단면굴착 후 내부의 pH 측정 결과는 다음의 Fig. 4.23과 같다. 사전처리구간의 구간 높이별 pH는 각각 7.94, 7.70, 8.51로 제 3기 이암에 복합슬래그와 중화·코팅제를 처리한 방법에 의한 개량된 효과가 지속되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 육안으로 재료 분리현상이나 제 3기 이암의 풍화정도가 낮게 관찰됨에 따라 배합설계의 적합성이 우수하다고 볼 수 있으며, 장기적으로 지반침하 문제나 산성배수 발생을 억제에 대한 지속적인 예방이 가능하다고 판단된다.



Fig. 4.23 Measurement results of pH from pre-processing section

#### 4.4.2 사후처리구간

사후처리구간의 중화·코팅제 주입시공에서 제 3기 이암의 처리량에 따른 중화·코팅제 주입량을 산출하는 방법은 Table 4.24와 같다. 사후처리구간의 체적을 중량으로 환산하여 이암의 총 중화 처리량은 67 ton으로 계산되었으며, 중량에 따라 주입수에 희석되는 중화제와 코팅제의 총량은 각각 268 kg, 67 kg으로 산출되었다. 물 주입량은 현장에 운용된 살수차의 용량인 5 ton으로 결정됨에 따라 최종 주입수에 대한 중화·코팅제 농도는 5.4%, 1.3%가 되었다. 성토구조체를 기존의 도로나 철도구조물로 설정하고, 산출 값 적용 및 안전 사항을 준수하면서 Fig. 4.24와 같이 중화·코팅제 현장 주입시공을 진행하였다.

**Table 4.24** Calculation of neutralizing and coating agent injection amount in post-processing section

Weight calculation to neutralize of post-processing section		Amount of neutralizing and coating agent	
Total volume = 93.8 m <sup>3</sup>		S 1% : NaHCO <sub>3</sub> 2.62%	
Consideration factors		Consideration factors	
Unit weight 1.3 t/m <sup>3</sup>	Porosity 45%	Reaction formula 1 : 2	Addition of 0.1% K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>
Conversion weight = 67 ton		Injection volume = 0.4% kg NaHCO <sub>3</sub> /t, 0.1% kg K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> /t	
Final calculated value			
In the case of 67 ton ,		0.4% NaHCO <sub>3</sub> = 268 kg 0.1% K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> = 67 kg	
Amount of Water injection = 5 ton, NaHCO <sub>3</sub> = 5.4%, K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> = 1.3%			



1. Horizontal perforation



2. Drain pipe perforating



3. Wrap the drain pipe non-woven



4. Inserting the drain pipe



5. Drawing the pipe after insertion



6. Water tank installation



7. Add Neutralizing & Coating agent



8. Neutralizing & Coating agent injection

Fig. 4.24 Photos from neutralizing and coating agent injection test of post-processing section

사후처리구간의 중화·코팅제 주입시공 후, 10일이 경과된 시점의 굴착 단면에 대하여 pH를 측정한 위치와 결과 값은 Table 4.25와 Fig. 4.25, Fig. 4.26과 같다. 총 30개의 측정점에서 pH 측정한 결과는 2.95 ~ 7.79로 나타났으며, 모든 구간에서 완벽한 중화·코팅제 처리효과가 나타나지 않았지만, 대다수의 측정 위치가 목표로 설정한 pH 4.5보다 높게 측정되어 주입시공의 효과를 입증할 수 있었다. 하지만 성토체의 균질한 다짐 정도와 제 3기 이암의 불균질한 구성 광물 분포가 주입시공에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다. 따라서 차후의 중화·코팅제 주입시공 시 공사구간을 분할하여 각 지반 특성에 맞는 주입량을 설정함으로써 시공성을 높인다면 산성배수가 발생하여 문제가 지속되고 있는 기존 구조물에 적용이 가능할 것으로 판단한다.

**Table 4.25** Measurement results of pH from post-processing section

Section	①		②		③		④		⑤	
	No.	pH								
Measuring point	P1-1	3.74	P2-1	7.79	P3-1	6.18	P4-1	7.17	P5-1	7.54
	P1-2	5.22	P2-2	5.23	P3-2	7.40	P4-2	6.90		
	P1-3	5.10	P2-3	6.79	P3-3	6.99	P4-3	4.33	P5-2	6.24
	P1-4	5.49	P2-4	7.01	P3-4	6.40	P4-4	4.37		
	P1-5	3.41	P2-5	7.12	P3-5	6.55	P4-5	6.13	P5-3	6.96
	P1-6	2.95	P2-6	5.10	P3-6	4.12	P4-6	4.73		
					P3-7	5.85	P4-7	3.21	P5-4	4.52

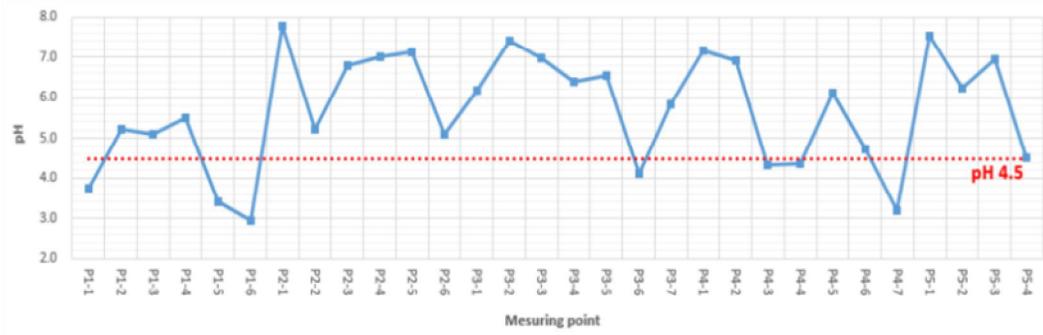


Fig. 4.25 pH measurement graph of post-processing section



Fig. 4.26 pH measurement location of post-processing section

#### 4.4.3 가적치구간

가적치구간의 성토 직후에는 제 3기 이암에 중화·코팅제만 처리한 효과를 계측한 결과를 확인하였으며, 시공된 지 약 12개월 이후에는 기존에 계획했던 임시 적치구간으로 설정하기 위해 Fig. 4.27과 같이 콘크리트 포장을 제거하였다. 이는 지표에 노출된 제 3기 이암을 자연적인 풍화 조건에서 적치하여 중화·코팅제 처리효과를 확인하기 위함이다. 가적치구간 내부의 이암 시료에 대한 pH 측정 결과, pH 6.26으로 모니터링 계측 시스템상에서 pH 12 이상으로 측정되는 결과와 확연한 차이를 보였다. 이는 pH meter가 비탈면 하단 부분 중 우수가 모이는 위치에 설치되어 있어 강우 발생 시 많은 중화·코팅제가 흘러 내려와서 pH가 급격하게 증가한 것으로 사료된다.

가적치구간이 성토된 지 18개월 이후, 내부 제 3기 이암을 채취하여 측정을 실시한 결과 pH 6.26 이상으로 중화·코팅제 처리효과가 발현된 것으로 확인된다. 따라서 가적치 기간에 따른 주입제 농도와 필요량에 대한 기준을 정립하여 토공에 활용되는 제 3기 이암에 적용함에 따라 폐기물 처리비용 절감 및 환경 오염 문제에 대한 개선 효과를 기대할 수 있다.



Fig. 4.27 Removing concrete pavement of temporary-stacking section

## 제 5 장 결론

### 5.1 연구 결과

본 연구는 포항지역에 고르게 분포되어 있는 제 3기 이암을 토목공사의 성토재나 채움재로 활용할 경우에 발생하는 물리·화학적 문제를 파악하고, 이를 해결하기 위해 방안으로 실내시험 및 배합설계를 통한 현장실증시험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

제 3기 이암의 물리적 특성을 파악하기 위해 실내시험을 실시한 결과 액성한계와 소성한계가 각각 66.6%, 41.7%인 압축성이 큰 점토(CH)로 분류되었다. XRD 분석으로 몬모릴로나이트와 일라이트 같은 점토광물의 비율이 높게 측정되었으며, 다짐시험을 실시한 결과 최대건조밀도는  $1.44 \text{ t/m}^3$ 로 도로공사 건설재료 품질기준(2017)을 충족하지 못했기 때문에 제 3기 이암을 전량으로 하여 도로공사의 성토재로 활용하기 어렵다고 판단된다.

제 3기 이암의 화학적 특성을 파악하기 위해 XRF 분석을 실시한 결과  $Al_2O_3$ 와  $Fe_2O_3$  같은 금속산화물이 다량 존재하고 있으며,  $CaO$ 는 지점별 함량의 차이가 크게 나타났다. 1 : 2 중류수 반응을 통해서 슬러지 형태의 이암은 구성광물에 따라 황철석( $FeS_2$ )의 산화가 촉진 및 지연하는 것으로 나타났으며, 산분해법 처리하여 양이온 분석을 실시하여  $Fe^{2+}$  농도가 높게 측정되었으며, 그 외 중금속 이온이 무기물질 위험 수준을 초과하는 농도로 분석되었다. 또한 NAG pH 실험하여 음이온 분석한 결과  $SO_4^{2-}$  농도가 다량 검출되어  $FeS_2$ 가 다량 존재함을 예측할 수 있다.

제 3기 이암의 산성배수 발생 개연성 평가를 위해 총 황 함량(%)을 분석한 결과 값으로 안전율(ANC/MPA)을 평가했는데 EN-R1, EN-R4는  $NAPP < 1$ 으로 산성배수 발생 개연성이 높으며, EN-R2, EN-R3은  $NAPP > 1$ 으로 안전한 것으로 평가되었다. 지화학적 분류도를 이용한 결과 EN-R1, EN-R1는 잠재적 산 발생(PAF)으로, EN-R2, EN-R3은 불확실(UC)로 분류되었다.

빗물에 의한 제 3기 이암의 산성배수 발생속도를 예측하기 위해 코팅제를 처리한 실험군과 무처리 대조군으로 구분하여 실험을 진행한 결과, 산 발생량(MPA)보다 산 중화량(ANC)이 산성배수 발생에 높은 연관성을 보였으며, 코팅제 처리로 산성배수 발생을 방지 및 지연시키는 효과를 확인하였다. 또한 코팅제는 산성 pH 조건에서 더 높은 코팅제 처리효과가 나타나는 것으로 확인되었다.

배합설계에 혼화재로 사용되는 복합슬래그에 대한 물성시험을 실시한 결과, 입도 입도가 불량한 자갈(GP)로 분류되었으며, XRD 분석을 통해 Ca-결합물의 구성이 높은 비율로 존재함을 알 수 있었다. 또한 XRF 분석으로  $Fe_2O_3$ 과  $CaO$ 의 함량이 높은 것으로 확인되었으며, 산분해법으로 처리하여 ICP로 분석하여 앞선 결과에 상응하는 높은  $Fe^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ 농도가 분석되었다. 복합슬래그의 중화 능력은  $CaCO_3$ 의 중화량 100% 기준으로 약 70%이며, 이암 시료의 평균 황 함량(S) 1%에 대한 복합슬래그의 중량비와 백분율 비의 평균은 7.61%로 산출되었다.

제 3기 이암의 물리·역학적 특성과 화학적 특성을 보완하기 위해 복합슬래그와 중화·코팅제 처리를 통한 배합설계를 실시하였다. 물리·역학적 특성을 분석한 결과 성토재의 일반기준에 충족하고, 설계한 일축압축강도에 준수하였으며, 혼화 재료의 치환비율이 적어 경제성이 우수한 배합조건 No. 4(이암 90%, 복합슬래그 10%, 중화·코팅제 처리)가 가장 적합한 배합설계로 선정되었다. 다음은 화학적 특성도 고려하여 실험한 결과로 황 함량에 대한 복합슬래그 비율에 최소 안전율(FS) 1.3을 적용하여 1 : 9.89 비율의 배합설계 조건이 산출되었다. 따라서 최종 선정된 배합조건 No. 4는 제 3기 이암의 모든 특성이 충족된다는 것을 확인할 수 있다.

성토구조체 중 사전처리구간을 No. 4 배합설계 조건으로 시공한 결과, 현장 다짐도는 94.5%, 지반반력계수는  $199.4 \text{ MN/m}^2$ 으로 측정되어 도로공사 성토재 노체기준을 충족하였다. 모니터링 계측 결과, 사전처리구간은 pH가 유지되고 함수량의 변동이 적어 복합슬래그의 잠재수경성이 발현된 것으로 보이며, 사후 처리구간은 중력배수의 영향으로 pH가 낮아지고 함수량 변화가 큰 것으로 확인되었다. 가적치구간은 중화·코팅제 과처리로 인해 pH가 알칼리 조건까지 높아져 산성배수 발생에도 충분한 중화 반응이 기대되지만, 알칼리배수에 의한 문제 발생을 고려하여 정확한 처리량 산정이 요구된다. 사전·사후처리구간의 침하량은 모두 도로의 허용 침하량 기준을 초과하지 않는 것으로 확인되었다.

각 구간별 실증시험 연구 성과를 육안으로 확인하기 위함으로 먼저 사전처리 구간에 단면굴착을 진행하였는데, pH 8.05로 측정되어 개량 효과가 지속되는 것을 확인하였으며, 제 3기 이암의 풍화 정도가 낮으며 배합 재료들의 분리현상이 없어 배합설계의 적합성이 우수하다고 판단된다. 사후처리구간은 시험시공 약 12개월 후, 상단부를 천공하여 중화·코팅제 주입 시험을 진행하여 31개의 지점을 측정한 결과, 대부분 pH가 산성배수 발생으로 판단하는 pH 4.5를 상회하고 있어 차후에 산성배수가 발생하는 도로나 터널과 같은 토목 구조물에 적용 가능할 것으로 판단된다. 가적치구간은 상부 콘크리트를 제거하여 제 3기 이암을 자연 풍화 조건으로 중화·코팅제 처리효과를 살펴본 결과, pH 6.26 이상으로 유지되는 것으로 확인되어 가적치 동안의 제 3기 이암이 자연적인 환경 조건에 의한 풍화가 지연 및 방지됨을 확인할 수 있다.

## 5.2 향후 연구 방향

우리나라 내 제 3기 이암이 분포하는 지역들은 지질구조 상 광물의 균질성이 매우 낮으므로 도로 또는 토공 재료로 사용할 경우에는 채취지역 및 심도에 따라 정밀한 지질조사를 실시할 뿐 아니라 채취지역 내에서도 지점 분할을 통해 대표성을 갖는 시료 선정하여 실내시험을 진행할 필요가 있다.

본 연구와 같이 제 3기 이암에 대한 정량분석을 통해 물리·역학적 특성을 파악하여 여러 토공 재료의 기준을 충족시킬 수 있는 배합조건 설계를 적용하거나 가적치 기간에 중화·코팅제 처리를 시행하면 제 3기 이암을 안전하게 활용 가능하다고 판단된다.

본 연구는 제 3기 이암으로 성토구조체를 시공하여 약 18개월 동안의 실내시험, 현장시험 및 모니터링 계측 시스템 결과를 토대로 작성되었다. 하지만 토목 구조물의 평균 내구수명으로 판단해보면 단기적으로 해석한 결과이므로 이를 장기적 관점에서 생각해 볼 필요가 있다. 현 시점에서는 사전·사후처리구간과 가적치구간에서 별다른 공학적 문제가 발생하지 않고 있지만, 복합슬래그의 잠재수경성 반응물질과 중화·코팅제의 소진이나 예상치 못한 환경적 요인으로 산성배수 발생할 소지가 다분하다. 따라서 본 연구에서 진행된 실제 빗물에 의한 산성배수 발생속도를 참고하여 제 3기 이암의 산성배수 발생 억제 및 중화 일수를 정확히 파악하는 장기적인 연구 활동과 정량분석에 의한 조건별 실무 매뉴얼 작성이 필수적으로 이행해야 된다고 본다.

## 감사의 글

한국해양대학교 대학원 진학을 결심하고 한국지질자원연구원 지질환경재해연구센터 연구생을 시작한 지 2년이 훌쩍 지나가고, 석사학위 과정을 마무리하게 되니 감회가 새롭습니다. 이 감사의 글을 통해서 2년 동안의 대학원 생활에 잊지 못할 추억과 많은 도움을 주신 분들에게 진심으로 감사의 마음을 전해드리고 싶습니다.

우선, 제가 공부에 전념할 수 있게 항상 기도해주시며 물심양면으로 응원해주신 사랑하시는 어머니, 사회생활에 대한 조언을 아낌없이 해준 친형에게 가장 먼저 감사의 마음을 전해드리고 싶습니다. 앞으로는 제가 가족의 행복을 위해 더욱 노력하겠습니다.

다음으로 한국지질자원연구원에서 공부할 수 있게 도와주시고, 지반공학에 대한 전문지식을 채워주시면서 석사과정을 마무리할 때까지 끊임없는 조언으로 지도해주신 김태형 교수님께 무한한 감사의 말씀을 전해드립니다. 교수님의 가르침을 잊지 않고 사회에 진출하여 훌륭한 인재가 되어 다시 찾아뵙겠습니다.

또한 연구원 생활에서 제게는 생소했던 산성배수리는 전문지식에 대해 알려주시고, 이를 토목공학 분야와 융합을 위한 연구 방향 및 방법에 대한 많은 가르침과 끊임없는 조언을 해주신 김재곤 박사님, 송영석 박사님, 전철민 박사님, 남인현 박사님, 이정화 선생님, 조용찬 박사님, 류정호 박사님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 논문 심사를 통해 논문을 잘 다듬어주신 김낙영 박사님께도 감사의 말씀을 전합니다. 앞으로도 박사님들께 습득한 전문지식을 백분 활용하는 제가 되도록 노력하겠습니다.

그리고 2년 동안 함께 좋은 추억을 남기면서 연구생 생활을 같이했던 세민이와 기용이, 화학적 지식을 알려준 멘토 미리, 내년에도 연구생 신분으로 연구에 매진할 자영이와 설희, 한국해양대학교 지반공학 연구실에서 번거로운 업무를 도맡아 해준 학주, 이외에 연구원에서 실험을 도와준 4차 인재양성 인턴 친구들과 시간제 알바생에게 감사하다는 말을 꼭 전하고 싶습니다.

이로써 대학원 석사 생활은 끝나지만, 앞으로 제 인생에서 더 무궁무진한 도전들이 기다리고 있으리라 생각합니다. 힘들고 어려운 상황에 직면하더라도 배움을 통해 습득한 지식과 경험을 바탕으로 헤쳐 나아가겠습니다. 감사합니다.

## 참고문헌

- 국토교통부, 2016. 건설공사 비탈면 설계기준.
- 디엠씨엠(DMCM), 2019. 산성배수 성토체 시험천공 후 중화제 주입 시험시공 시공계획서. (주)디엠씨엠, pp.1-4.
- 정강복, 2006. 포항지역 이암의 공학적 특성 및 변형거동에 관한 연구. 영남대학교 대학원 박사학위논문, pp.8-24.
- 지상우, 송호철, 2012. 산성배수 평가 및 피해저감 대책. 한국방재학회, Vol. 12, No. 2 pp.22-32.
- 한국도로공사(KEC), 2017. 고속도로 건설재료 품질기준.
- 한국지질자원연구원(KIGAM), 2007. 도로건설 절취사면의 산성배수 발생저감을 위한 피막형성기술 개발 건설기술혁신사업 최종보고서. 건설교통부.
- 한국지질자원연구원(KIGAM), 2014. 광산개발에 따른 지질환경재해 확산 제어기술 개발 최종보고서. 미래창조과학부.
- 한국토지주택공사 토지주택연구원(LHI), 2013. 고로슬래그 콘크리트의 현장적용 기술 개발.
- 한국폐기물협회(KWASTE), 2011. 철강슬래그 재활용제도 개선방안 마련연구. 환경부.
- 황상일, 김태우, 1997. 포항지역의 지형경관.
- Ban, H. K., Lee, H. Y., Bae, K. J., Cho, W. J., 2015. Engineering Properties of Uncemented Mudrock from Yeosu Area, Gyeonggi-Do. Korean Geo-Environmental Society Vol. 16, pp.53-58.
- Bttcher, M. E., Smock, A. M. and Cypionka, H., 1998. Sulfur isotope fractionation during experimental precipitation of iron (II) and manganese (II) sulfide at room temperature. Chem. Geo., 146, pp.127-134.

- Cha, C., Kwon, S. H., Lee, H. S., Kim, J. G., Song, Y. S., 2018. Study on Embankment Test for Economic Application of Acid Drainage Rock. Korean Society of Civil Engineers, Vol. 2018, No. 10, pp.3-4.
- Chadda, L. R., 1970. Phenomenon of aggregation in the stabilization of soils with cement. Associated Cement Companies Limited, Vol. 44, No. 5, pp.210-212.
- Dearman, W. R., 1976. Weathering classification in the characterization of rock: A revision: Bulletin International Association Engineering Geologists, Vol. 13, pp.373-381.
- Evangelou, V. P., 1995. "Pyrite oxidation and its control" , CRC Press, inc.
- Evangelou, V. P., 2001. "Pyrite microencapsulation technologies : Principles and potential field application. Ecological Engineering, Vol. 12, pp.165-178.
- Floyd, M., Czerewko, M. A., Cripps, J. C. and Spears, D. A., 2003. Pyrite oxidation in lower lias clay at concrete highway structures affected by thaumasite, Gloucestershire, UK. Cement and Concrete Research, v.25, pp.1015-1024.
- Geological Society Engineering Group Working Party, 1995. The description and classification of weathered rock for engineering purposes: Quarterly Journal Engineering Geology, Vol. 28, No. 3, pp.207-242.
- Gillott, J. E., 1968. "Clay in engineering geology." Elsevier, Amsterdam, p.296.
- Godfrey, N., 1980. A Field Recognition Guide to Swelling Clay Rich Weathering Profiles in Overburden Sediments in the Northern Bowen Basin. "Sediments Through the Ages" Proc 5th Australian Geological Convention, Perth, W.A. Geological Society of Australia Inc.

- Golez, N. V. and Kyuma, K., 1997. Influence of pyrite oxidation and soil acidification on some essential nutrient elements. *Aquacultural Engineering*, v.15, pp.107-124.
- Hillwood, A. L., Horwitz, P., Appleyard, S., Barton, C. and Wajrak, M., 2006. Acid sulfate soil distribution and metals in groundwater : implications for human exposure through grown produce. *Environ. Pollution.*, v.143, pp.100-105.
- Jae Gon Kim, 2007. Acid Drainage and Damage Reduction Strategy in Construction Site: An Introduction. *Econ. environ. geol.*, v.50, pp.651-660.
- Ji, M. K., Yoon, H. S., Ji, E. D., Lee, W. R., Park, Y. T., Yang, J. S., Jeon, B. H., Shim, Y. S., Kang, M. H., Choi, J. Y., 2010. Development of Control Technology for Acid Mine Drainage by Coating on the Surface of Pyrite using Chemicals. *Korean Society of Groundwater Environment*, Vol. 15, No. 4, pp.46-52.
- Kalin, M., Wheeler, W. N. and Olaveson, M. M., 2006. Response of phytoplankton to ecological engineering remediation of a Canadian shield lake affected by acid mine drainage. *Ecological Engineering*, Vol.28, pp.296-310.
- Kim, D. H., Jin, S. J., Jeon, J. G., 2012. Current Status and Prospect of Utilization of Steel Slag. *Korea Concrete Institute*, 24(6), pp.28-30.
- Kim, J. M., Cho, S. H., 2010. Present State on the Production and Recycling of Steel Industry By-products. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, v.5, no.1, pp.11-14.
- Kirby, C.S., Thomas, H.M., Southam, G. and Donald, R, 1999. Relative contributions of abiotic and biotic factors in Fe(II) oxidation in mine drainage. *Applied Geochem.*, v.14, pp.511-530.

- Kock, D. and Schippers, A., 2006. Geomicrobiological investigation of two different mine waste tailings generating acid mine drainage. *Hydrometallurgy*, v.83, pp.167-175.
- Kondo. R. and Ueda. S., 1968. Kinetics and Mechanisms of the Hydration Cement. *Proceedings of 5th International Symposium on the Chemistry of Cement*, Vol. II-4, pp. 203-255.
- Koryak, M., Shapiro, M. A. and Sykora, J. L., 1972. Riffle zoobenthos in streams receiving acid mine drainage. *Water Research*, v.6, pp.1239-1274.
- Lee, G. H., Kim, J. G., Lee, J. S., Kim, T. H., Lee, S. H., Song, Y. G., 2006. Laboratory Study for Phosphate Coating on Pyrite Surface for Reduction of Acid Rock Drainage. *Korea Geotechnical Society*, Vol. 2006, pp.1083-1089.
- Lee, G. M., Kim, J. G., Lee, J. S., Chon, C. M., Park, S. G., Kim, T. H., Ko, G. S. and Kim, T. K., 2005. Generation characteristics and prediction of acid rock drainage(ARD) of cut slope. *Econ. Environ. Geol.*, v.38, pp.91-99.
- Lee, S. H., Park, J. S., Jung, Y. W., 2001. The Effect on Latent Hydraulic Property of the Blast-furnace Slag by Alkali Activator. Vol. 2001, pp.929-934.
- Lee, S. H., Kim, W. K., Kang, S. H., 2012. Hydration Mechanism of Ground Granulated Blast Furnace Slag. *Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 6, pp.31-34.
- Lee, Y. N., Kim, Y. I., Jung, H. J., Kim, Y. G., 2002. Problems in Construction of Tunnel and Rock Slope at Mudstone and Shale Region. *Korea Geotechnical Society*, pp.115-140.
- Li, C., Sun, H., Li, L., 2010. "A Review : The composition between Alkali-Activated Slag (Si+Al) and Metakaolin Cements" . *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp.1341-1349.

- Morgenstern, N. R. & Price, V. E., 1974. "Classification of argillaceous soils and rocks." Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100, pp.1137-1156.
- Moh, Za-Chieh, 1965. Reaction of soil minerals with cement and chemicals. Highway Research Board, No. 86, pp.39-61.
- Muhrizal, S., Shamshuddin, J., Fauziah, I. and Husmi, M. A. H., 2006. Changes in iron-poor acid sulfate soil upon submergence. Geoderma, v.131, pp.110-122.
- NIAST, 2000. Taxonomical classification of korean soils. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea.
- Nordstrom, D.K., 1982. Aqueous pyrite oxidation and the subsequently formation of secondary minerals. In Hossner, L.R., J.A. Kittrick, and D.F. Fanning (eds), Acid sulphate weathering, SSSA, Madison, WI. pp.37-56.
- Nyavor, K. and Egiebor, N. O., 1995. "Control of pyrite oxidation by phosphate coating." The Science of the Total Environment, Vol. 162, pp.255-237.
- Park, S. G., Kim, J. G., Lee, J. S., Kim, T. K., Ko, K. S., Lee, G. H., 2005. Damage Conditions of the Slope Structures due to ARD. Korea Geotechnical Society, Vol.2005, pp.878-883.
- Powers, J. P., 1992. Construction dewatering : New methods and applications. second edition, pp.38-45.
- Smart, R., Skinner, W.M., Levay, G., Gerson, A.R., Thomas, J.E., Sobieraj, H., Schumann, R., Weisener, C.G., Weber, P.A., Miller, S.D., and Stewart, W.A.. 2002, ARD test handbook: Project P387A, A Prediction and Kinetic Control of Acid Mine Drainage. Melbourne: AMIRA international Ltd., pp.A4-8, pp.D3-4.

- Santi, P. M., 2006. Field Methods for Characterizing Weak Rock for Engineering. Environmental & Engineering Geoscience, Vol XII, No. 1, February 2006, pp.1-11.
- Shaw, H. F., 1981. Mineralogy and petrology of the argillaceous sedimentary rock of the UK. Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 14, pp.227-290.
- Shin, K. S., Lee, B. K., Kim, G. Y., 2012. Durability of Concrete Using Blast Furnace Slag Powder. Korean Recycled Construction Resource Institute, v.7, n.3, pp.13-17.
- Snethen, D.R., Townsend, F.C., Johnson, L.D., Patrick, D.M., and Vedros, P.J., 1975. A review of engineering experiences with expansive soils in highway subgrades. Waterways Experiment Station, NTIS No. ADA 020309, pp.4-25.
- Sobek et al., 1978. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils. pp.47-50.
- Standards Australia International Ltd, 2000. Method of testing soils for engineering purposes, part 0 : General requirements and list of methods, AS 1289.0-2000.
- Stum, W. and Morgan, J. J., 1995. Aquatic chemistry : Chemical equilibria and rates in natural waters, 3th edition. John Wiley and Sons Inc., New York, pp.1022.
- Taylor, R. K. and Spears, D. A., 1981. Laboratory investigation of mudrocks. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Vol. 14, pp.291-309.
- Taylor, R. K., 1988. "Coal measures mudrock : composition, classification and weathering process." Quarterly Journal of Engineering Geology, London, Vol. 121, pp.85-90.

Tagnit-Hamou, A., Saric-Coric, M. and Rivard, P., 2005. Internal deterioration of concrete by the oxidation of pyrrhotitic aggregates. *Cement and Concrete Research*, v.35, pp.99-107.

Van Eeckhout, E. M., 1976. The mechanisms of strength reduction due to moisture in coal mine shales. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, Vol. 13, No. 2, pp. 61-67.

Zhang, Y.L. and Evangelou, V.P., 1998. Formation of ferric hydroxide-silica coatings on pyrite and its oxidation behavior. *Soil Science*, 163, pp.53-62.

社団法人日本セメント協会, 2012. セメント系固化材による地盤改良マニュアル, p.248.

