

공학석사학위논문

풍화에 의한 이암의 전단강도  
감소효과

Strength Reduction Effect of Mudstone by  
Weathering

지도교수 이 봉 직

2018年 02月

한국교통대학교 글로벌융합대학원

건설공학과 지반공학전공

박 노 현

풍화에 의한 이암의 전단강도  
감소효과

Strength Reduction Effect of Mudstone by  
Weathering

지도교수 이 봉 직

이 논문을 공학석사학위논문으로 제출함

2018年 02月

한국교통대학교 글로벌융합대학원

건설공학과 지반공학전공

박 노 헌

# 박노현의 공학석사학위논문을 인준함

2017年 11月

심사위원장     신 계 종 ①

심사위원     엄 대 용 ①

심사위원     이 봉 직 ①

한국교통대학교 글로벌융합대학원

# 요 약

## 제 목 : 풍화에 의한 이암의 전단강도 감소효과

각종 건설공사에서 종종 마주치고 있는 현안 중 하나는 셰일층에서의 설계 및 시공이다. 셰일층은 풍화에 매우 민감하고, 수분함유시 팽창하는 특성을 가지고 있으며, 이와 같은 슬레이킹 현상에 의해 이암지역에 시공된 구조물의 경우 지반침하문제 등으로 피해가 발생한 사례들이 많다.

더욱이 위치와 심도에 따라 고결된 이암과 미 고결된 이암이 혼재되어 분포하고 있는 경우 그 공학적 성질도 매우 복잡하다. 이암층 중 속성작용으로 고화된 퇴적암은 풍화의 정도에 따라 경암-연암-풍화암-풍화토로 구분되는 반면에 미고결 퇴적층은 퇴적물이 암석이 되는 과정 중에 지반의 용기로 고화작용이 중단되어 암석과 퇴적물의 특성을 동시에 보여준다. 미고결 퇴적층은 다짐이나 고결작용, 재결정화작용이 완전하게 이루어지지 않아 침식과 같은 풍화에 취약하며, 구조물의 지지층으로써 연암과 유사한 강도정수를 보이지만 지표면에 노출된 환경에서 내구성은 풍화암보다 낮은 연경도로 평가된다.

구조물의 설계 및 시공에 있어서는 풍화로 인한 강도감소가 고려되지 않은 상태에서 지반조사 및 실내실험을 수행하고 지반 강도정수를 적용하고 있는 실정이다. 셰일층에서의 안정성 평가 조사당시에 평가된 지반강도정수를 이용하여 설계 및 시공을 진행 할 경우 시간경과에 따른 급격한

강도감소를 고려하지 못하며, 특히 지반이 노출되어 시간이 경과하거나 건조 및 습윤조건이 빈번하게 변화하는 경우 강도감소로 인한 각종 안정성 문제가 발생할 수 있다. 따라서 이암이 분포하고 있는 지반에서 구조물의 기초, 비탈면 절취, 쌓기 비탈면의 재료 활용 등을 위해서는 이암의 풍화 특성과 풍화에 따른 강도특성의 규명이 필요하다.

이에 본 연구에서는 이암지역에서 시료를 불교란 형태로 채취하고 풍화 조건에 따른 실내 시험을 실시하여 장기적인 지반의 강도저감특성을 평가하고자 하였다. 연구결과 전단강도의 침투강도와 잔류강도의 차이가 크며 수침기간이 증가할수록 상당량의 전단강도 감소가 발생하는 것으로 나타나 지반정수 산정 시 풍화에 따른 강도감소효과를 고려하여야 하는 것으로 분석되었다.

# 목 차

요 약 .....	i
목 차 .....	iii
표 목 차 .....	vi
그림목차 .....	vii
기 호 .....	ix
<b>I. 서 론 .....</b>	<b>1</b>
1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 연구동향 .....	2
1.3 연구내용 및 방법 .....	4
<b>II. 이암의 특성 및 전단강도 .....</b>	<b>6</b>
2.1 이암의 특성 .....	6
2.2 이암의 암석학적 특성 .....	7
2.2.1 이암의 주요 성분 .....	8
2.2.2 조직 및 구조 .....	9
2.2.3 색깔 .....	9
2.3 이암의 공학적 문제점 .....	10
2.4 이암의 거동 특성 .....	11
2.4.1 이암의 Slaking 메커니즘 .....	11

2.4.2 이암의 팽창 메커니즘 .....	12
2.5 이암의 공학적 분류 .....	13
2.6 흙의 전단특성 .....	15
2.6.1 흙의 전단강도 .....	15
2.6.2 지반종류에 따른 전단강도 특성 .....	20
<b>Ⅲ. 지반조건 및 실내시험방법 .....</b>	<b>24</b>
3.1 지반조건 .....	24
3.1.1 지질조건 .....	24
3.1.2 토질조건 .....	25
3.1.3 암반조건 .....	26
3.2 실내시험 방법 .....	27
3.2.1 XRD 시험 .....	27
3.2.2 팽창성시험 .....	28
3.2.3 Slaking 시험 .....	29
3.2.4 직접전단시험 .....	33
3.2.5 잔류강도시험 .....	36
3.2.6 수침에 따른 강도시험 .....	38

IV. 결과분석 및 고찰 .....	40
4.1 XRD 시험결과 .....	40
4.2 팽창성 실험 결과 .....	41
4.3 Slaking 시험 결과 .....	43
4.4 자연상태에서의 직접전단시험 .....	44
4.5 잔류강도 시험결과 .....	46
4.6 수침에 따른 강도시험 .....	49
 V. 결    론 .....	 53
 참 고 문 헌 .....	 55
Abstract .....	59



## 표 목 차

표 1.1 연구방법 .....	5
표 2.1 풍화된 이암의 분류 .....	14
표 3.1 이암풍화토의 물리적 특성 .....	26
표 3.2 이암의 공학적 특성 .....	26
표 3.3 Gamble에 의한 耐 Slaking 특성의 분류 .....	32
표 3.4 Slaking의 분류(양과 속도) .....	33
표 4.1 XRD시험 결과 .....	40
표 4.2 Swelling실험 결과 .....	42
표 4.3 Slaking실험 결과 .....	43
표 4.4 잔류강도실험 결과 .....	47
표 4.5 수침에 따른 강도실험 결과 .....	49

## 그림 목 차

그림 2.1 흡수팽창과 팽윤현상의 차이점 .....	12
그림 2.2 점토질 재료의 공학적 분류 .....	14
그림 2.3 사질토에 대한 직접전단시험 특성 .....	21
그림 3.1 연구대상구간의 지표지질조사 결과 .....	25
그림 3.2 입도분포자료 .....	25
그림 3.3 XRD 실험장치 .....	27
그림 3.4 Swelling 시험기 .....	28
그림 3.5 Slaking 시험장치 .....	30
그림 3.6 제안되고 있는 내구도와 소성지수에 의한 내 Slaking도의 분류(Gamble, 1971) .....	31
그림 3.7 하부이동식 전단시험기 .....	34
그림 3.8 직접전단시험장치 .....	35
그림 3.9 시료의 수침과정 .....	38
그림 4.1 XRD시험 결과 .....	40
그림 4.2 팽창성 시험 결과 .....	42
그림 4.3 직접전단실험 결과(Test 1) .....	44
그림 4.4 직접전단실험 결과(Test 2) .....	45
그림 4.5 잔류강도를 이용한 지반정수(Test 1) .....	48
그림 4.6 잔류강도를 이용한 지반정수(Test 2) .....	48
그림 4.7 수침에 따른 전단강도(6시간) .....	50
그림 4.8 수침에 따른 전단강도(24시간) .....	50
그림 4.9 수침에 따른 전단강도(48시간) .....	51
그림 4.10 수침에 따른 전단저항각 변화 .....	51

그림 4.11 수침에 따른 점착력 변화 ..... 52

## 기 호

$\tau$	: 흙의 전단강도
$c$	: 잠착력
$\phi$	: 전단저항각
$\sigma$	: 수직응력
$\phi_p$	: 최대전단저항각
$OCR$	: 과압밀비
$I_{d2}$	: 내 Slaking 지수
$I$	: 흙수팽창율
$d$	: 최대팽창량
$L$	: 초기길이

# I. 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

각종 건설공사에서 종종 마주치고 있는 현안 중 하나는 문제성 토질에서의 설계 및 시공이다. 국내의 문제성 토질로 대표적인 것은 함탄층, 셰일층, 석회암층 등이 있으며 각 지층 특성에 따라 다양한 안정대책을 수립하고 있다.

이중 셰일층은 풍화에 매우 민감하고, 수분 함유 시 팽창하는 특성을 가지고 있으며, 이와 같은 Slaking 현상에 의해 이암지역에 시공된 구조물의 경우 지반침하문제 등으로 피해가 일어난 사례들이 많다.

더욱이 위치와 심도에 따라 고결된 이암과 미고결된 이암이 혼재되어 분포하고 있는 경우 그 공학적 성질도 매우 복잡하다. 이암층 중 속성작용으로 고화된 퇴적암은 풍화의 정도에 따라 경암-연암-풍화암-풍화로 구분되는 반면에 미고결 퇴적층은 퇴적물이 암석이 되는 과정 중에 지반의 용기로 고화작용이 중단되어 암석과 퇴적물의 특성을 동시에 보여준다. 미고결 퇴적층은 다짐이나 고결작용, 재결정화작용이 완전하게 이루어지지 않아 침식과 같은 풍화에 취약하며, 구조물의 지지층으로써 연암과 유사한 강도정수를 보이지만 지표면에 노출된 환경에서의 내구성은 풍화암보다 낮은 연경도로 평가된다(김성욱 등, 2009).

반면에 구조물의 설계 및 시공에 있어서는 풍화로 인한 강도감소가

고려되지 않은 상태에서 지반조사 및 실내실험을 수행하고 지반 강도정수를 적용하고 있는 실정이다. 세일층에서의 안정성 평가 조사당시에 평가된 지반강도정수를 이용하여 설계 및 시공을 진행 할 경우 시간경과에 따른 급격한 강도감소를 고려하지 못하며, 특히 지반이 노출되어 시간이 경과하거나 건조 및 습윤 조건이 빈번하게 변화하는 경우 강도감소로 인한 각종 안정성 문제가 발생할 수 있다. 따라서 이암이 분포하고 있는 지반에서 구조물의 기초, 비탈면 절취, 쌓기 비탈면의 재료 활용 등을 위해서는 이암의 풍화특성과 풍화에 따른 강도특성의 규명이 필요하다.

이에 본 연구에서는 이암지역에서 시료를 불교란 형태로 채취하고 풍화조건에 따른 실내 시험을 실시하여 장기적인 지반의 강도저감특성을 평가하고자 하였다.

## 1.2 연구동향

이암의 특성에 관한 다양한 연구를 살펴보면 김경완(2002)은 이암 퇴적토의 Slaking에 따른 전단 및 압축 특성에 관한 연구에서 이암 퇴적토가 Slaking 및 Swelling 현상에 기인됨을 인식하고 서로 상이한 두 종류의 이암시료를 인위적으로 건조·습윤상태를 반복하여 Slaking에 따른 이암의 물리적, 역학적 특성을 규명하고 장차 이암 퇴적토의 공학적 연구와 각종 토목구조물의 설계, 시공에 필요한 기본 자료를 제시 하였다.

이강빈(2002)은 포항지역에서 채취된 자연시료를 슬러지 상태에서 예비 압밀과정을 통하여 재성형 시킨 후 등방 및 세 가지 비등방 압밀응력비 조건하에서 반복축차응력비를 변화시켜 일련의 비배수 반복 삼축 시험을 실시하였으며, 이 시험을 토대로 압밀응력비의 변화가 반복하중을 받는 이암 풍화토의 동적 탄성계수, 과잉간극수압비 및 반복 전단강도에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

김영수 등(1997)은 이암을 대상으로 재성형된 이암 풍화토에 대한 표준압밀시험을 실시하여 압밀특성 및 이방성에 대한 성질을 규명하였다. 더불어 김영수 등(2000; 2003)은 이암 풍화토의 투수 특성을 연구하였다. 전병주 등(2009)은 포항지역의 이암지역의 사면붕괴 사례를 연구하였으며, 이규환 등(2007)은 미고결된 이암의 성토재 활용성을 평가하였다. 또한 이영휘(1996)는 포항이암을 대상으로 시간 의존적 특성을 분석하였다.

이진수 등(2000; 2002)은 전남지역의 이암을 대상으로 내구성, 강도 특성, 전단 및 압축특성 등을 밝히기 위한 연구를 수행하였다.

국외의 경우, Dhaka et al.(2002)는 주로 일본지역에 분포하고 있는 화산쇄설암이나 퇴적암등의 슬레이크 내구성과 광물학적인 특성에 대해서 연구하였다. Anwar et al.(2000)은 물의 침투에 따라 매우 예민해지는 팽창 가능성이 있는 이암들을 대상으로 Swelling 시험과 Slaking 시험을 실시하여, 시간에 따른 팽창과 슬레이크 내구성 지수를 파악하는 연구를 수행하였다. 더불어 Pejon et al.(2002), Gokeogu et

al.(2000), Ogaard et al.(1997) 등의 국외연구자들도 주로 이암의 일반적인 내구성 및 팽창특성에 초점을 맞춘 연구를 수행하였다.

### 1.3 연구내용 및 방법

이암의 공학적 특성과 풍화에 따른 강도저감효과를 평가하기 위하여 이암지역에서 시료를 불교란 형태로 채취하고 풍화조건에 따른 실내 시험을 실시하였다.

실내실험은 X-선 회절분석, 팽창성 시험, Slaking 시험, 잔류강도시험, 수침에 따른 직접전단시험 등을 실시하였다.

X-선 회절분석은 이암 입자의 구성성분을 확인하기 위하여 수행하였으며, 팽창성 시험은 암석의 광물과 미세균열 사이로 물이 침투하여 암석의 체적이 팽창되는 정도를 측정하는 시험이다. 또한 건조, 습윤의 반복에 의하여 암석입자의 결합이 파괴되어 강도가 저하하는 특성을 평가하고자 Slaking 시험을 실시하였다.

이암 풍화토의 침투 전단강도를 평가하기 위하여 직접전단시험을 실시하였으며, 이때의 수직응력은 30, 60, 90, 120kPa를 적용하였다. 잔류강도시험은 역전식 잔류전단시험을 실시하였으며, 수침에 따른 강도를 평가하기 위하여 채취시료의 수침시간을 3, 6, 24, 48시간으로 변경시켜가며 전단강도를 평가하였다. 상기의 연구방법을 정리하면 표 1.1과 같다.



표 1.1 연구방법

	실험항목	실험조건	지반조건
Test series 1	XRD 시험	-	이암 풍화토
Test series 2	팽창성시험	0 ~ 100시간	이암 풍화토
Test series 3	Slaking 시험	건습 2회 반복	이암 풍화토
Test series 4	직접전단시험	수직응력 30, 60, 90, 120 kPa	이암 풍화토
Test series 5	잔류강도시험	수직응력 30, 60, 90, 120 kPa	이암 풍화토
Test series 6	수침에 따른 전단강도시험	수침시간 3, 6, 24, 48시간	이암 풍화토

## II. 이암의 특성 및 진단강도

### 2.1 이암의 특성

점토가 굳어서 생긴 암석으로 사암보다 세립인 퇴적암의 총칭이며 퇴적암 중에서는 가장 많은 암석이다. 점토는 입자지름이 1/16mm 보다 작은 쇄설물을 말하며 그것들의 대부분을 차지하는 암석이 이암이다. 또한 입자지름 1/256mm 이상 되는 점토성분의 함유량에 따라 실트암·점토암으로 나뉘는데 육안으로 이 2가지를 식별하기는 어렵다. 모래를 다소 많이 함유한 실트암은 사질(沙質) 실트암, 실트를 다소 많이 함유한 점토암은 실트질 점토암이라고 한다. 야외에서의 호칭으로는 극세립 사암이나 실트질 사암을 이암에 포함시키는 경우가 많다.

엽층(葉層 lamina)이 발달한 이암으로서 그 형성과정에서 엽층면 또는 그것과 거의 평행하게 박리성(剝離性)이 발달한 것을 셰일(혈암)이라 하여 이암과는 구별하는 경우가 있다. 변성작용을 받아 엽층과는 관계 없이 박리성이 발달한 것을 점판암(slate)이라 한다. 이암은 세립의 조직과 복잡한 조성으로 이루어지며 퇴적암 중에서는 가장 보편적인 것이지만 그다지 많은 연구가 이루어지지 않았다.

일반적인 편광현미경에 의한 관찰로는 조직이나 조성을 식별하기 어렵다. 그러나 최근에는 주사전자현미경, 시차열분석 등의 방법을 이용한 연구가 진행되고 있다.

## 2.2 이암의 암석학적 특성

이암은 점토를 많이 함유하고 있어 풍화작용을 받을 경우 공학적 성질이 급격히 변화하여 강도 및 내구성의 저하현상 등 토사와 유사한 거동을 보여 토목공사에 위험한 요소를 많이 내포하고 있는 암석이다. 풍화된 시료를 실험용 시료로 가공하기 어렵고 적용 가능한 실험법이 적어 공학적 특성이나 거동을 정량적으로 파악하는 기법이 다른 암종에 비해 제한되어 있다. 현재까지 강도측정과 같은 일반적인 물성의 단순 측정보다는 내구성을 분석하는 Slaking 내구성 시험, 팽창율 측정시험 등의 정량화시험법이 주로 사용되고 있다. 이러한 실험치의 해석에서 단일 시험치만으로 지질공학적인 특성을 파악하는 경우 잘못된 판단을 할 수 있으므로 X-선 회절분석시험, 주사현미경(SEM) 미지 분석시험, 투수계수 측정시험 등도 함께 수행하여 실험결과를 종합적으로 해석하는 것이 바람직스럽다.

이암은 지질학적 암편의 약 65%를 차지하고 있는 가장 많은 퇴적암이다. 석유나 천연가스의 기원암이고 저류암과 대수층(지하수를 간직하고 있는 다공질 삼투성 지층)의 덮개암으로 형성된다. 또한, 많은 금속의 모암이며 점토질 암석으로 알려져 있다. 이암을 이루는 입자들은 세립질이기 때문에 이암의 조직, 구조, 광물성분을 알아내기가 힘들다.

## 2.2.1 이암의 주요 성분

이암의 주요성분으로는 점토 광물, 석영, 장석, 탄산염 광물, 유기 물질 등이 대표적이다. 평균 60%정도가 점토 광물로 이루어져 있고, 점토질 암석에 포함된 점토의 종류는 지층의 지질학적 시대에 따라 다르게 나타나며, 최근 지층일수록 팽창성 점토가 많이 포함되어 있다.

이암에서 석영의 양은 그 모양과 대부분 점토 박편의 높은 복굴절 때문에 종종 과소평가 되어 왔다. 석영의 함유량은 화학작용과 X-ray의 기술을 기초로 약 31%로 측정 되었다.

이암에서 장석의 함유율이 45%까지 높을지 모르나 그것은 차후에 높은 환경 에너지로 파괴되고, 속성작용으로 제거되고 결국 대부분의 이암 속에서 적은 양으로 존재한다.

탄산염 광물은 하나의 이암 속에 약 3.6%의 탄산염이 들어있는 것으로 추정되며, 유기 물질은 이암에 있어서 소량의 구성 물질이지만 화학적 작용의 매개로 작용한다.

벤토나이트는 화산재의 변질상태에서 형성된 점토의 집합암이다. 벤토나이트층은 한 번의 폭발이나 단시간 내의 여러 번의 폭발에 의해 생성되며, 명백한 화산 기원의 다른 광물과 관계가 있다.

### 2.2.2 조직 및 구조

이암은 대부분 석영이나 점토로 형성되어 있다. 각각의 입자는 너무 작아서 육안으로 구별하기 힘들다. 이빨로 긁어서 또는 조금씩 깨물어 약간 씹어보면 모래 같은 느낌이 드는 것으로 실트암을 점토암으로부터 구별해내는 것은 가능하다.

이암은 다양한 구조를 가지며 어떤 것은 단지 박편으로만 볼 수 있다. 또한, 이암의 특이한 특징은 작은 규모의 사층리(cross-bedding), 점층리(graded-bedding), 붕낙(slumping), 깎고 메우기(cut and fill), 구멍들(burrows), 자파쇄작용(autobrecciation)이 일어나며, 더 명백한 쪼개짐과 엽층이 나타난다. 쪼개짐(fissility)은 평행한 층리면을 따라 깨지는 이암의 성질이다. 그것은 점토 박편의 우선 방향에 기인하며, 이 쪼개지는 이암을 셰일이라 한다. 이상적으로 점토는 층리에 평행하게 놓이지만 그 정도는 부분적으로 생물교란, 속성작용에 의존한다.

### 2.2.3 색깔

점토질 암석의 색깔은 매몰 당시의 환경에 대한 정보를 제공한다. 어두운 계통의 암석일수록 더 많은 양의 유기질 물질을 함유하고 있는 것이다. 점토질 암석의 색깔이 붉거나 갈색, 또는 노란색일 경우 철 분자가 함유되어 있는 것이다.

FeO는 붉은색, FeO(OH)는 갈색이고 갈철광(limonite)은 노란색이다.

단지 몇 퍼센트의 적철광(hematite)이 짙은 붉은색을 만들어 내기도 한다.

### 2.3 이암의 공학적 문제점

이암에서 각종 문제를 발생시키는 문제요인으로 squeezing, swelling, slaking 등이 있다.

squeezing이란 터널 굴착 후 유도되는 응력 상태가 무결암의 강도를 초과하여 무결암을 항복시켜 큰 변형을 일으키는 것을 의미한다. 즉, squeezing 현상에 의해서 터널 단면은 점차적으로 축소가 일어나고 터널의 지보에 큰 손실을 주게 된다.

swelling 현상은 물과 접촉 시 부피가 크게 팽창하는 현상으로, 팽창성이 강한 점토를 함유한 이암이 물과 만나게 되면 swelling 현상이 일어나게 된다. swelling pressure는 터널의 lining에 압력을 미쳐 터널의 안정성에 영향을 미친다. swelling 현상을 막기 위해서는 터널로의 지하수 유입을 차단하는 것이다.

Slaking이란 풍화에 따른 암반이 잘게 부서지는 현상으로 표면에 노출된 이암은 Slaking이 일어나므로 가능한 한 빨리 노출된 암석을 보호하는 것이 중요하다.

## 2.4 이암의 거동 특성

### 2.4.1 이암의 Slaking 메커니즘

자연상태 그대로는 상당한 고결력을 가진 암석이라도 지하수위 변동, 지하굴착에 의한 응력해방과 흡수팽창, 풍화 등에 의하여 암석의 고결력이 저하되는 경우가 있다. 특히 포항지역에 분포되어 있는 신생대 제3기의 이암과 같이 연약하고 점토성분을 많이 함유한 암석에서는 강우 등의 환경변화에 따른 건조·습윤의 반복 작용에 의하여 고결력 내지 강도가 급격히 떨어져 본래의 조직이 파괴되어 심한 경우에는 입자가 분리되어 토양화하게 되는데 이를 슬레이킹이라 한다. 이암지대에서 발생하는 사면붕괴는 대부분이 슬레이킹 현상에 의해서 발생된다고 볼 수 있다.

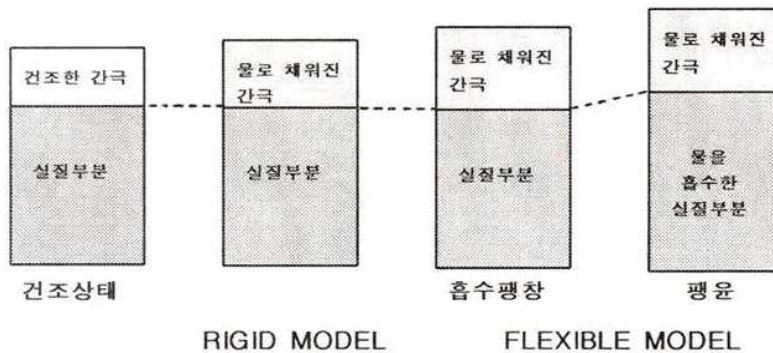
Van Eeckhout(1976)은 습도변화가 이암의 팽창수축에 미치는 영향을 조사하는 과정에서 건조의 반복에 의하여 진행성으로 연장된 내부의 불연속면을 통하여 암반에 함수비가 증가하게 되고, 그 결과 비교적 작은 파괴에너지만으로도 암반은 붕괴될 수 있다는 것을 발견하였다.

이암 덩어리를 공기 중에 방치했을 때 높은 인장력으로 인하여 외측 공극부분에 공기가 유입되고, 그 후에 암석을 포화시키면 모관현상에 의하여 물이 이암 속으로 침투하기 때문에 갇혀있던 공기는 압력을 받게 된다. 이러한 Slaking 과정을 통하여 암석의 골격 구조에 응력이 가해지고, 여기에 건조과정이 반복되면 내부의 불연속면이 연장 되어 궁

극적으로는 공기압에 의한 파쇄(air breakage)로 이암의 덩어리가 작은 조각으로 부서지게 된다. 이암의 Slaking 현상은 함수에 의한 팽창변형률(swelling strain) 또는 팽창압(swelling pressure)과도 밀접한 관계가 있어, 암석의 광물성분 중 팽창성 점토광물인 Na<sup>-</sup> montmorillonite 함량이 절대적으로 중요한 인자라고 볼 수 있다.

## 2.4.2 이암의 팽창 메커니즘

흙이나 연한 암석이 수분을 흡수하면 전체 체적이 증가하는 현상으로 흡수팽창현상과 팽윤현상이 있다. 이와 같은 현상을 총괄하여 팽창(swelling)이라 하는데 일반적으로 3층 구조를 가진 점토광물이 그 경향이 강하다. 암석의 흡수상태에 관하여 그림 2.1에서와 같은 모델을 사용하여 흡수 팽창현상과 팽윤현상에 대하여 설명하고 있다.



[그림 2.1] 흡수팽창과 팽윤현상의 차이점



흡수팽창은 주로 실질부분의 변화는 없고 유효간극이 물로 채워진 것에 의한 물리적 체적 증가를 말한다. 따라서 암석의 조직이나 구조에 지배되며 또한 불포화로 유효간극을 가진 결합력이 약하게 된 암석에 보이는 현상이다. 특히, 굴착에 의한 응력해방 시에 이 흡수팽창에 의한 문제가 일어나기 쉽다.

팽윤현상은 유효간극이 물로 채워지고 팽창해도 아직 실질부분에서 물을 흡수하고 체적증가를 계속하는 현상이다. 이것은 상온에 물과 공존해서 결정학적 성질이 변화하는 광물로 구성된 경우에 일어나는 것으로 특히 이암의 점토광물인 몬모릴로나이트(montmorillonite)에서는 점토입자의 층 사이에 물 분자가 흡착하여 체적은 현저히 증가한다. 따라서 구속압 하에서도 상당한 팽윤압을 발생하게 된다. 이암이나 과압밀 점토의 팽창은 점토입자의 격자구조와 물이 상호작용을 통하여 발생하는 매우 복잡한 과정이다.

## 2.5 이암의 공학적 분류

일반적인 지질공학적 성질들의 측면에서 볼 때 이암은 흙과 암석의 중간적인 특징을 나타내고 특유의 열화특성을 가지고 있다. 일반적으로 표 2.4에서와 같이 이암을 풍화의 정도에 따라서 분류하고 있는 경우도 있지만 공학적 성질에서 암석과 과압밀된 점토 사이의 구분은 대단히 어렵고 복잡하다. 또한, 지배적인 입자의 크기에 따라서 이암을 분류하고 있는 방법도 있다. 그러나 이암은 실트와 점토 크기의 입자들을 많



크고 열화하는 동안 강도손실이 40%이하일 때를 이암으로, 비배수전단 강도가 250psi 이하이고 강도손실이 60%를 초과할 때는 점토로 분류하였다.

## 2.6 흙의 전단특성

### 2.6.1 흙의 전단강도

직접전단시험은 상하로 분리된 전단상자 속에 시료를 넣고 수직하중을 가한 상태로 수평력을 가하여 전단상자 상하단부의 분리면을 따라 강제로 파괴를 일으켜서 간편하게 지반의 강도정수를 결정할 수 있는 시험이다. 그 결과는 토압, 사면의 안정, 구조물 기초의 지지력 등의 계산에 이용하며 한국공업규격 KS F2343에 규정되어 있다.

직접전단시험에서는 수직응력이 전체 전단면에서 등분포 된다고 가정한다. 공시체가 너무 두꺼우면 수직응력의 분포가 부등할 수 있으며 전단 중에 시료가 휘어지기 때문에 전단상자벽과 공시체가 밀착하지 않을 수 있음을 알아야 한다. 따라서 큰 단면의 특수 전단시험에서도 공시체의 두께는 수 cm 정도가 되어야 한다.

일반적으로 직접전단시험은 배수조절을 하지 않고 간극수압이나 부피변화의 측정이 없으므로 시험의 속도가 빠를 뿐 아니라, 시험절차가 간단하여 강도정수만을 목적으로 할 경우 실용적으로 많이 활용되는 시험이다. 즉, 직접전단시험을 통하여 시료가 전단파괴되는 최대수평력을

시료의 단면적으로 나눈 최대전단응력과 수직하중을 단면적으로 나눈 수직응력을 얻는데 이들을 좌표로 하는 Mohr의 파괴포락선에서 시료의 강도정수인 전단저항각과 점착력을 구할 수 있다.

지반은 보통의 고체재료와 같이 인장이나 전단에 의하여 파괴된다. 그런데 지반의 인장저항력은 무시할 수 있을 만큼 작으므로, 지반은 인장저항력이 없다고 간주해도 무방하다. 따라서 지반에서는 대개 전단저항력만이 문제가 되며 흙이 최대로 발휘할 수 있는 전단저항력을 전단강도(shear strength)라고 한다. 흙의 전단파괴시의 응력상태를 나타내는 3개 이상의 모어 응력원을 그리면 그 외접선이 대개 완만한 곡선이 되는데 이를 Mohr-Coulomb의 파괴포락선(Mohr-Coulomb failure envelope)이라고 한다. Mohr-Coulomb의 파괴포락선은 낮은 응력상태에서는 직선으로 가정할 수 있으며 그 직선의 절편을 점착력(cohesion)  $c$ , 경사각을 전단저항각(internal friction angle)  $\phi$ 라고 정의하면 임의의 응력상태에서 흙의 전단강도를 다음과 같이 직선식으로 표현할 수 있다.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (\text{식 2.1})$$

여기서,  $\tau$  : 흙의 전단강도

$c$  : 점착력

$\sigma$  : 수직응력

$\phi$  : 전단저항각

## (1) 점착력(cohesion)

점착력은 수직응력이 영일 때 즉,  $\sigma = 0$  때 지반의 전단강도로 정의하며, 이는 지반을 연직으로 굴착할 수 있는 능력으로 이해할 수 있다. 즉, 연직으로 굴착할 수 있는 지반은 점착력을 갖고 있다. 그러나 점착력은 지하수에 무관하고 여러 가지 요인들에 의하여 영향을 받으며 이들에 의한 영향은 아직까지 완전히 규명되지 않고 있다. 점착력은 입자 주위를 둘러싸고 있는 물의 표면장력에 의해 발생되며 그 크기는 점토 광물의 함량과 선행압밀에 의하여 결정된다. 따라서 지반의 함수비가 증가할수록 점착력은 작아지며 액성상태에서는 흡착수에 의하여 둘러싸여진 입자간의 거리가 멀어져서 더 이상 인력이 작용하지 않기 때문에 점착력은 실제로 영이 된다.

사질토에서 모세관현상 등에 의해서 지하수위보다 상부에 있는 흙의 간극 속에 남아있는 물은 부압상태이며 이로 인해서 발생하는 점착력을 겔보기 점착력이라 한다. 겔보기 점착력은 지반이 완전히 건조되거나 포화되어 모관수가 없어지면 소멸되므로 일상적으로는 고려하지 않는다.

## (2) 전단저항각

지반의 전단저항각은 지하수에 무관하고 대체로 지반의 안식각과 거의 일치하며 현장에서 건조한 상태로 안식각을 측정하여 대신할 수도

있다. 그러나 정확한 값은 전단시험을 실시하여 결정해야 한다. 흙은 흙 입자와 물 및 공기로 구성되어 있어서 전단에 대해 민감하다. 일반적으로 소성파괴를 일으키지 않고 지지할 수 있는 최대 전단 또는 인장 응력을 전단강도 또는 인장강도라고 하며 그밖에도 입자가 파쇄되거나 입자간 결합이 떨어지는 한계응력을 강도라고도 한다. 그러나 지반에서 흙입자의 결합이 떨어져서 입자 배열이 흐트러지는 상태를 파괴되었다고 말한다. 균질한 흙에서는 등방압력이 크면 입자가 압력을 받아 상대변위가 억제되기 때문에 전단강도가 증가한다. 축차응력이 클수록 흙입자 사이의 마찰력의 크기는 흙입자의 배열에 의한 영향을 크게 받는다. 흙입자 간의 마찰저항은 주로 건조마찰, 회전마찰, 형상마찰에 의하여 발생된다.

#### ① 건조마찰(맞물림 마찰 + 미끄럼 마찰)

두 개의 고체가 접촉한 상태에서 상대적인 운동을 하면 두 물체의 형상에 상관없이 접촉면에서의 수직력이 클수록 마찰이 커진다. 이것은 흙입자 간의 접촉점이 완전한 평면이 아니고 몇 개의 점점에 접촉되어 있기 때문이다. 접촉점은 서로 맞물림 역할을 하며 수직력이 클수록 맞물림 역할이 커진다(맞물림 마찰). 접촉점이 부스러지면서 활동을 일으키기 위해서는 매우 큰 힘이 필요하며 석영에서는  $110 \times 10^4 \text{MNf}/\text{m}^2$  정도의 힘이 필요하다. 일반적으로 점점에서는 응력이 집중되어 흙입자

의 파괴가 일어나며 접면에서는 소성변위가 일어나고 변위가 일어난 후에는 새로운 위치에서 새로운 접촉점과 접면이 생긴다. 따라서 입자의 표면조도는 입자표면에 있는 중간 크기의 요철의 빈도와 불룩한 부분에서의 조도로 분리하여 설명할 수 있다. 접촉점이 부스러지면 미끄러지면서(미끄럼 마찰) 다음 평형상태로 옮겨가며, 접촉점에서의 파괴강도 외에도 접촉면에 묻어 있는 석회 등의 이물질에 의해서도 마찰저항이 달라진다.

## ② 회전마찰

전단면에 있는 흡입자가 회전하면, 회전에 의해 에너지가 소모되어 마찰거동이 달라진다. 회전마찰은 수직력과는 무관하나 입경에 의해서 영향을 받는다. 입경이 클수록 흡입자 돌출부의 입경에 대한 상대적인 크기가 작아지므로 모멘트 효과가 커져서 입자가 회전하게 된다.

## ③ 형상마찰

흡입자의 상대적인 위치 바꿈은 건조마찰과 회전마찰 이외에도 흡입자의 썪기효과에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 흡입자의 전단변위에 대항하는 힘은 입자간의 마찰과 형상저항에 의해 발생되며 이를 포괄적으로 내부마찰이라고 한다.

## 2.6.2 지반종류에 따른 전단강도 특성

### (1) 사질토의 전단강도

사질토의 Mohr-Coulomb 파괴곡선은  $\sigma - \tau$  평면의 원점을 통과하므로 강도정수 2개 중에서 점착력  $c$ 는 0이 되어 Mohr-Coulomb 파괴 공식은 단순히  $\tau_f = \sigma \tan \phi$ 가 된다. 사질토는 전단변형 시 대체로 부피변화를 일으키는데, 조밀한 상태에 있는 사질토는 부피증가를, 그리고 느슨한 상태의 사질토는 부피감소를 일으킨다. 미시적인 입장에서 그 이유를 설명하자면, 우선 느슨한 상태의 사질토 내에 전단변형이 일어나면, 입자와 입자가 서로 미끄러지면서 빈 공간을 채우게 되어 입자와 입자가 전단변형 전보다 더 가깝도록 재배열되어 부피가 감소하고, 조밀한 상태의 사질토 내에 전단변형이 발생하면, 본래 입자와 입자들이 엇물림(interlocking) 상태에 있기 때문에 초기에는 얼마간의 압축이 일어나지만, 그 후 전단변형이 더 커지기 위해서는 뒤의 입자가 앞의 입자위로 굴러 올라가거나 입자가 전단면을 따라 깨어져야 하는데, 일반적인 구속응력 하에서는 전자의 경우가 보다 쉽게 일어난다. 이와 같이 엇물림 상태에서 입자가 입자위로 올라가게 되면 자연히 부피증가를 가져오게 되는데, 이와 같은 성질을 조밀한 사질토의 팽창성(dilatancy)이라고 한다.

위에서 언급한 현상을 직접전단시험 결과를 이용하여 설명하면 그림 2.3과 같다. 그림 2.3(a)는 직접전단시험 시 전단응력과 횡방향 변위의



관계를 나타내는데, 조밀한 사질토는 입자들의 미끄러짐에 대한 마찰저항 외에 엇물림을 해소하기 위한 저항력 때문에 동일한 구속응력하에서 느슨한 사질토보다 더 큰 전단저항력을 발휘하게 되는데, 부피가 팽창한 후에도 전단변형이 계속되면 마찰저항력만 남게 되어 궁극적으로 느슨한 사질토와 같은 전단저항력을 갖게 된다. 따라서 조밀한 사질토의 전단강도는 두 가지로 볼 수 있는데, 하나는 최대전단강도(peak shear strength)이고, 다른 하나는 극한(궁극)전단강도(ultimate shear strength)이다.

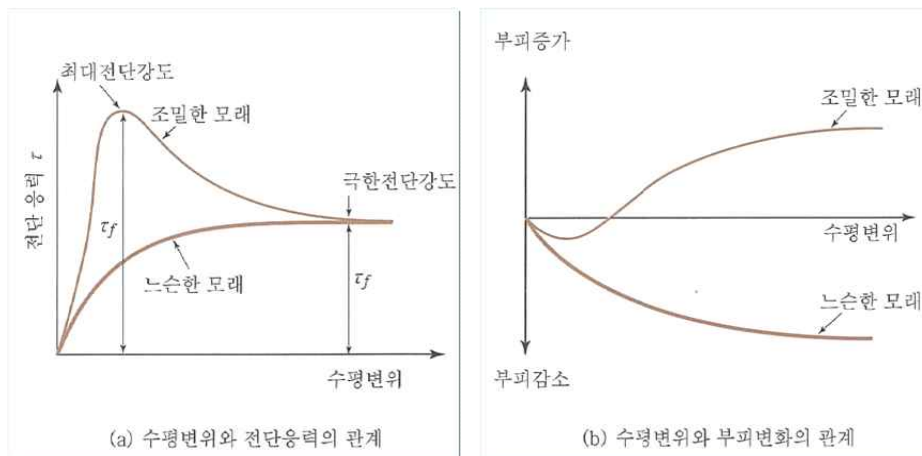


그림 2.3 사질토에 대한 직접전단시험 특성

극한전단강도는 동일한 구속응력하에서 사질토의 밀도에 상관없이 일정하다. 최대강도와 극한강도를 이용하여 각각 Mohr-Coulomb 파괴곡선을 작도하면, 그림 2.3(a)와 같이 되어 최대전단저항각( $\phi_p$ )과 극한전

단저항각( $\phi_u$ )으로 구분된다. 그림 2.3(b)는 전단변형에 따른 사질토의 부피변화를, 나타내고 있다. 위에서 정의한 최대전단저항각( $\phi_p$ )과 극한 전단저항각( $\phi_u$ )은 당면한 문제에 따라 선택적으로 사용되어야 하는데, 최대전단저항각은 사질토 내부의 작은 전단변형하의 전단강도 산정 시 사용하고, 극한전단저항각은 사질토 내부의 비교적 큰 전단변형에서의 전단강도 산정 시, 또는 콘크리트 구조물과 같이 거친 표면과 사질토 사이의 마찰저항 산정 시 사용한다. 그림 2.3(b)에서 보는 바와 같이 아주 느슨하지도 않고, 또 아주 조밀하지도 않은 어떤 특정한 밀도에서 사질토는 전단변형 시 부피변화를 일으키지 않는데, 이때의 간극비를 한계간극비(critical void ratio)라고 한다. 이 한계간극비는 구속압력이 커지면 약간씩 작아진다.

## (2) 점성토의 전단강도

점성토는 사질토와 비교해서 크게 두 가지 다른 점이 있다. 그중 하나는 점성토의 역학적 거동이 과거의 응력이력(stress history)에 큰 영향을 받는다는 점이고, 다른 하나는 투수성이 아주 낮기 때문에 완전히 포화된 상태에서 비교적 짧은 기간 동안 하중을 받는 경우에 비배수 조건하에서 거동을 하게 된다는 점이다. 과거의 응력이력에 따라서 점성토는 정규압밀 점성토와 과압밀 점성토로 구분이 되는데, 정규압밀 점성토는 현재 그 지반이 받고 있는 상재압력(overburden pressure)이

과거에 경험했던 최대의 연직압력인 경우이고, 과압밀 점성토는 과거에 경험했던 최대연직압력보다 현 지반의 상재압력이 작은 경우의 점성토를 의미한다. 과압밀의 정도를 나타내기 위하여 과압밀비 (overconsolidation ratio, OCR)를 식 2.2와 같이 정의한다.

$$OCR = \frac{\text{과거에 경험한 최대연직압력}}{\text{현 지반에서의 유효상재압력}} \quad (2.2)$$

점성토의 전단강도 특성은 정규압밀점토에서는 포락선이 원점을 통과하므로 점착력은 0이고, 전단 시 시료의 수축으로 인하여 정의 간극수압이 나타나므로 유효응력으로 표시한 Mohr 원은 크기가 같고 간극수압 만큼 왼쪽으로 이동하게 되어  $\sigma'$ 의 값이  $\sigma'_{cu}$  값보다 크게 나타난다. 과압밀점토는 점토입자간의 결합으로 인하여 점착력을 갖게 되어 파괴포락선이 세로축과 교차하므로 점착력과 전단저항각이 모두 얻어지며, 전단될 때에는 시간이 지남에 따라 시료가 팽창하려는 성향으로 인하여 부의 간극수압이 나타나므로 전응력으로 표시한 Mohr원이 왼쪽으로 나타난다. 과압밀점토를 시험할 때 압밀압력을 선행압밀압력 이상으로 가하여 CU시험을 했다면 Mohr포락선은 마치 정규압밀점토에 대한 시험과 같게 그려진다.

### Ⅲ. 지반조건 및 실내실험방법

#### 3.1 지반조건

본 연구를 위해 이암쇄설물을 채취한 구간은 국내의 가장 대표적인 이암분포지역인 포항 일원이며 지질조건 및 채취시료의 물리적 실험과 암석에 대한 암석실험결과를 정리하면 다음과 같다.

##### 3.1.1 지질조건

연구대상구간의 지질조건은 신생대 제 3기에 해당하는 퇴적층이 영일만의 내륙을 따라 분포하고 이들 구성 암석은 암질이 연약하기 때문에 저구릉성 산지와 하천을 따라 넓은 충적층을 형성하고 있다. 지표지질조사 결과 이암의 풍화대의 층리와 일부 습곡이 있는 층리가 발달하고 있으며, 굳은 점토가 역처럼 분포하고 있는 것으로 관찰되었다.

기반암으로 이암과 셰일이 호층을 이루며 심부까지 분포하고 이를 충적층 및 홍적층이 부정합 관계로 피복하고 있으며, 풍화대가 깊게 형성되어 있다. 그림 3.1은 연구대상구간의 지표지질조사결과를 나타낸 것이다.



그림 3.1 연구대상구간의 지표지질조사 결과

### 3.1.2 토질조건

이암풍화토는 연구대상 인근에서 시험굴조사를 실시하고 불교란시료를 블록샘플링 기법으로 채취하여 밀봉된 상태로 실험실로 이동한 후 실내실험을 실시하였다. 실험은 체분석과 다짐시험을 실시하였으며 그림 3.2는 체분석 실험결과를 나타낸 것이다.

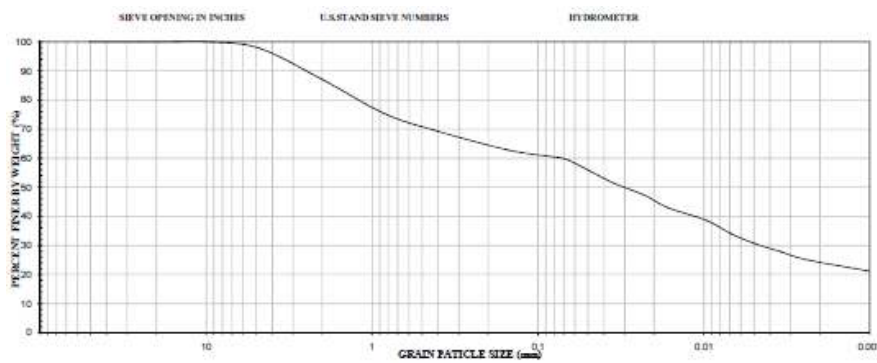


그림 3.2 입도분포자료

토질은 이암이 풍화되어 형성된 잔적토이며, 토질의 물리적 특성을 평가한 결과 통일분류법상 SC로 나타났다. 표 3.1은 이암풍화토의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

표 3.1 이암풍화토의 물리적 특성

# 4	# 10	# 40	# 200	2mm	USCS	$G_s$	O.M.C (%)	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )
100.0	100.0	93.9	49.8	13.11	SC	2.658	24.1	15.19

### 3.1.3 암반조건

이암 풍화토의 모양이 되는 이암에 대한 암석의 특성을 평가하기 위해 시추조사 시 불교란 시료를 확보하여 암석실험을 실시하였다. 표 3.2는 기본적인 암석실험결과를 나타낸 것이다.

표 3.2 이암의 공학적 특성

단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	흡수율 (%)	$V_p$ (km/s)	$V_s$ (km/s)	일축강도 (MPa)	포와송비
26.073	0.23	3.157	1.692	3.92	0.224

## 3.2 실내실험 방법

### 3.2.1 XRD 시험

X-선 회절분석(XRD)은 1921년 Von Laue에 의해 고안된 후 많은 분야에서 응용되어 왔으며, 특히 결정질 내의 원자간 간격과 배열 등에 관한 내용들을 알아내는데 탁월하다. 금속이나 폴리머형태 물질의 물리적 성질을 규명하는데도 매우 유익한 것으로 알려져 있다.

X-선을 시료에 조사하면 결정물질에 의해 X-선이 회절하고 그 때의 회절각도와 회절강도는 특정물질 고유의 것으로 이러한 수치로 구성물의 종류를 파악하는 방법이다.

본 실험에서는 시료를 70 $\mu\text{m}$ 이하로 파쇄하여 사용하였다. 분석기기는 검출기 분해능이 5.9keV~196eV인 SCINTAG MODEL XDS 2000로 그림 3.3과 같으며, 분석조건은 4KW의 에너지로 발생시킨 X-선을 이용하여 2 $\theta$ 값이 10~60°범위에서 0.08°간격으로 측정하였다.



그림 3.3 XRD 실험장치

### 3.2.2 팽창성시험

팽창성 시험은 암석의 광물과 미세균열 사이로 물이 침투하여 암석의 체적이 팽창되는 정도를 측정하는 시험으로 암석의 조성광물 특성상 팽창성이 높아 시공 전·후에도 암석팽창에 의하여 지반과 구조물에 위험성이 우려되는 대표적인 시료에 시험을 수행한다.

현장에서 채취한 샘플을 특수톱을 사용하여 압밀링에 들어갈 수 있도록 일정한 두께와 크기로 가공한다. 1차 가공은 거친 샌드페이퍼를 사용하고 샌드페이퍼의 거칠기를 줄여가며 반복하여 최종 공시체를 제작한다. 이때 주의하여야 할 점은 암석이 건조되면서 박편으로 부서지기 때문에 시편가공은 자연함수비 상태에서 실시하여야 한다. 시편제작이 완료된 후 압밀링에 그리스를 도포하고 시료를 설치하였다. 팽창변형률 시험은 횡방향 구속상태에서 연직하중이 없을 경우에 대하여 실시하였다. 각 시험에서 변형률은 그 값이 일정할 때까지 계속해서 측정하고 팽창변형률 지수는 최종변형량을 초기시료두께로 나눈 값을 백분율로 환산하여 산정하였다, 그림 3.4는 팽창성 실험장치를 나타내고 있다.

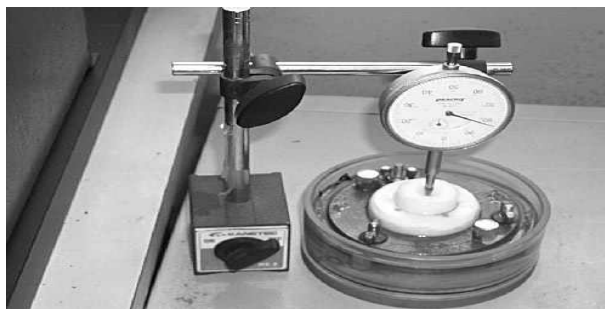


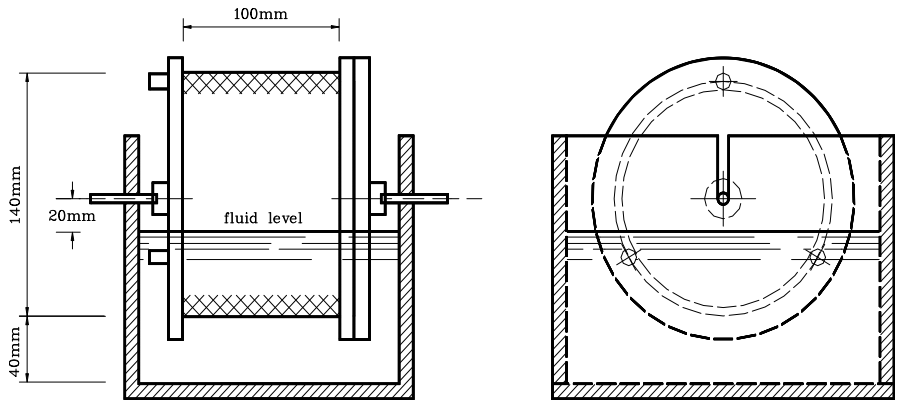
그림 3.4 Swelling 실험기



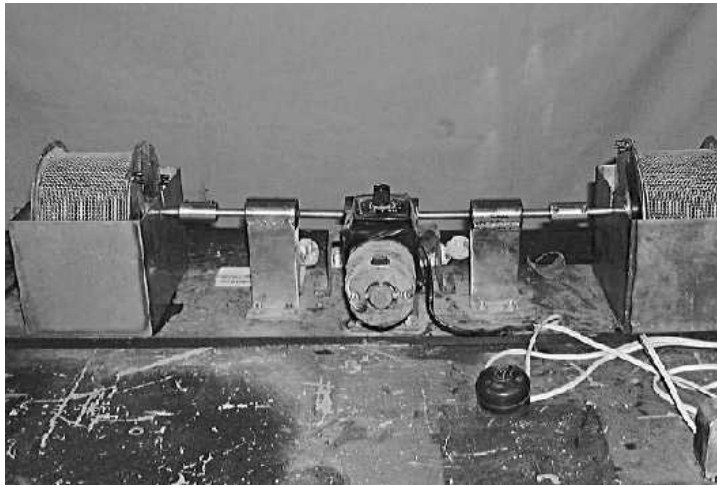
### 3.2.3 Slaking 시험

자연상태 그대로는 상당한 고결력을 가진 암석이라도 지하수위 변동, 지하 굴착에 의한 응력해방과 흡수팽창, 풍화 등에 의하여 암석 고결력이 저하된다. 연약한 암석에서는 환경 변화에 의거한 건조·습윤의 반복에 의하여 암석입자의 결합이 파괴되어 강도가 저하하고 심한 경우에는 입자가 분리되어 토양화하는 현상이 가속화되므로 이 특성 파악하고자 Slaking 실험을 실시하였다.

Slaking 내구도는 건조·침수상태의 반복에 대한 암석의 저항의 척도를 나타내는 것으로 암석시료에 건습 반복을 2회 주었을 때의 취약화 또는 연질화에 대한 저항성을 조사하는 것을 말한다. 이것의 측정을 위해 중량을 정확히 측정한 40~60g의 대표적인 암괴 10개를 시험장치의 드럼(2mm 표준철망으로 된 길이 100mm 직경 140mm의 원통관)에 넣고 105℃의 온도로 2-6시간 노건조 한 후 드럼을 수조에 장착하고 회전축 아래 20mm까지 물을 넣고 이 드럼을 200rpm으로 10분간 회전시킨다. 그 후 드럼을 수조로부터 꺼내고 105℃의 온도로 노건조시키고 냉각한 후 중량을 측정한다. 이 조작을 적어도 2회 이상 실시하여 암석의 내구도를 측정하며 본 시험에 사용된 Slaking 시험장치는 그림 3.5와 같다.



(a) 모식도



(b) 실험기 전경

그림 3.5 Slaking 시험장치

최종건조중량을 초기중량으로 나누고 내 Slaking지수(건습 2번 반복)  
 $I_{d2}$ 를 식 (3.1)과 같이 구한다.

$$\text{내 Slaking 지수 } I_{d2} = \frac{C-D}{A-D} \times (100\%) \quad (3.1)$$

여기서,  $I_{d2}$  : Slaking내구성 지수(건습 2번 반복)

A : 초기의 (시료+드럼) 중량

C : 최종의 (시료+드럼) 중량

D : 드럼 중량

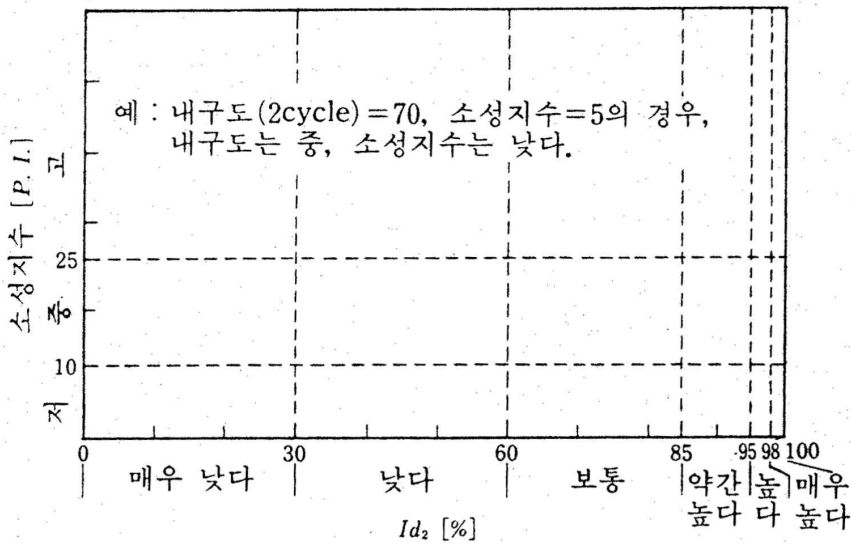


그림 3.6 제안되고 있는 내구도와 소성지수에 의한 내 Slaking도의 분류(Gamble, 1971)

2회의 시험cycle후, 드럼에 남은 암편의 건조중량의 시험 전 건조중

량에 대한 백분율을 slaking 내구성 지수  $I_{d2}$ 라고 하며  $I_{d2}$ 의 값이 낮을수록 Slaking하기 쉽고 100%에 가깝게 될수록 내구성이 좋은 재료로 간주된다.

분류는 시험 횟수에 의한 영향이 Gamble에 의해 제안되고 있으며, 이 제안은 내구성이 밀도에 비례하고 함수비에 반비례한다는 실험결과에 의거한 것이다. 이 내 Slaking지수가 낮은 암석에 대해서는 소성지수와 관련시킨 분류도 제안되고 있다.

표 3.3 Gamble에 의한 耐 Slaking 특성의 분류

구 분	1회 10분간 회전후 잔류량 % (건조중량)	2회 10분간 회전후 잔류량 % (건조중량)
극히 높은 내구성	> 99	> 98
고 내구성	98 ~ 99	95 ~ 98
중~고정도 내구성	95 ~ 98	85 ~ 95
중정도 내구성	85 ~ 95	60 ~ 85
저 내구성	60 ~ 85	30 ~ 60
극히 낮은 내구성	< 60	< 30

표 3.4 Slaking의 분류(양과 속도)

Slaking 속도	Slaking 량				
	매우작다 (VL) WL<20	작다 (L) 20<WL<50	중간정도 (M) 50<WL<90	크다 (H) 90<WL<140	매우크다 (VH) WL>140
늦다 (S) $\Delta IL < 0.75$	VL S	L S	M S	H S	VH S
빠르다 (F) $0.75 < \Delta IL < 1.25$	VL F	L F	M F	H F	VH F
매우 빠르다 (VF) $0.75 < \Delta IL < 1.25$	VL VF	L VF	M VF	H VF	VH VF

### 3.2.4 직접전단시험

직접전단시험은 상하로 분리된 전단상자 속에 시료를 넣고 수직하중을 가한 상태로 수평력을 가하여 전단상자 상하단부의 분리면을 따라 강제로 파괴를 일으켜서 지반의 강도정수를 결정할 수 있는 방법이다.

동일시료로 만든 공시체 3~4개에 대해서 수직하중만 달리 작용하여 측정된 전단 저항력으로 수직응력과 전단응력 관계를 선형으로 해석한다. 이 직선이 Mohr-Coulomb 파괴 기준으로서 기울기가 내부 마찰각 ( $\phi$ ),  $\tau$ -축 절편이 점착력(c)이다.



[그림 3.7] 하부이동식 전단시험기

전단상자 단면은 원형과 정사각형이 있으며, 두께는 20mm가 표준이다. 정방형은 전단 중에 변하는 유효 단면적 산출이 쉬운데 반해 원형은 곤란하며, 수직응력의 응력분포는 균등하다.

이암 잔적토의 모암인 이암은 습한 환경에 놓이거나 자연함수비에서 물속에 잠길 때 여전히 무결하게 남아있으나 약간 건조되거나 역학적으로 교란 될 때에는 빠르게 분해된다. 이러한 특성을 고려하여 장기간의 굴착에서 강도의 변화가 발생할 수 있으며, 표면내구성과 성토재료의 특성 평가에 있어 이와 같은 강도 감소 특성을 고려하여야 한다.

본 실험에서는 현장에서 채취된 이암 잔적토를 대상으로 직접전단시험을 수행함으로써 자연상태의 이암 잔적토에 대한 전단강도를 산정하여 그 결과를 분석하고자 하였다.



a) 시료추출 과정



b) 전단시험장치

그림 3.8 직접전단시험장치

실험은 불교란 시료를 채취하여 전단강도를 산정하였으며 시험 시 적

용된 전단속도는 0.25mm/min이며 수직응력은 30, 60, 90, 120kPa를 적용하였다. 그림 3.8은 직접전단시험을 위한 시료 채취 과정과 실험에 사용된 직접전단시험 상자를 나타낸 것이다.

### 3.2.5 잔류강도시험

일반적으로 잔류강도에 도달하기 위해서는 매우 큰 변위량이 요구되므로 전통적인 시험장비를 사용하여 잔류강도를 측정하기는 곤란하다. 따라서 시험과정에서 큰 변위량이 요구되는 전단강도의 측정을 위해서는 특수하게 설계된 링전단시험 및 역전식 잔류전단시험을 실시하여야 한다.

기존의 파괴면을 따라 전단을 유도하는 직접전단 또는 삼축시험은 파괴면을 포함하는 불교란시료의 취득이 곤란하며 인공절단면에 대한 직접전단시험은 연직하중에 의한 압밀의 영향으로 시료의 절단면과 전단상자의 상하부 경계면이 일치하지 않아 실제 잔류강도 보다 약간 큰 값이 측정되는 경향이 있다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 빠른 속도로 전단상자의 전·후진을 반복한 후에 절단면을 따라 전단시험을 수행하는 방법을 제안하고 있으나 이 방법은 전후진의 반복과정에서 잔류강도에 영향을 미치는 세립자의 유실이 발생하는 문제가 있다.

상기 시험방법에 대한 기존의 연구결과에 의하면 역전식 잔류강도 시험방법이 링전단 시험방법에 비해 실제적으로 근접한 결과가 나오는 것으로 보고되고 있는 점을 고려하여 본 실험에서는 역전식 전단시험 방



법을 수행하였으며, 시험방법은 다음과 같다.

- ① 불교란 시료를 컷팅을 이용하여 삽입하기 전에 전체중량을 측정하여 단위 중량 및 함수비를 체크한다.
- ② 준비된 시료에 컷팅을 넣고 시료가 교란되지 않도록 수직으로 조심스럽게 내부로 밀어 넣는다.
- ③ 컷팅을 직경 6.35cm×높이 2.0cm의 전단상자에 넣고 삽입원판을 사용하여 밀어 넣는다.
- ④ 전단상자에 설치된 공시체 위에 여과지, 다공질판 및 가압판을 올려놓고 세팅한다.
- ⑤ 수직력 재하장치를 설치하여 소정의 수직하중을 가하여 압밀이 완료된 것을 확인한다. 본 연구에서는 수직하중을 30, 60, 90, 120 kPa에 대하여 실시하였다.
- ⑥ 압밀과정이 끝난 후 전단력 전달장치로 전단상자의 전단속도 0.25mm/min가 얻어지도록 설정하여 전단한다.
- ⑦ 전단시험은 수평변형률이 시료직경의(6.35cm) 15%인 10mm까지 이 전단하였다.
- ⑧ 전단이 끝난 후 전단파괴가 일어난 시료를 수직력을 제거한 후 빠르게 다시 전단력 전달장치를 이용하여 원위치 시킨다.
- ⑨ 잔류강도를 얻을 때까지 상기의 과정을 반복 실험한다.

### 3.2.6 수침에 따른 강도시험

지반의 붕괴는 여러 요인이 복합적으로 작용하여 발생하는 것이 일반적이다. 그중 주요인으로는 설계단계에서 지반을 구성하고 있는 재료의 강도정수 값을 적절히 반영하지 못한 점과 시간경과와 더불어 건습의 반복작용에 따른 풍화와 그로 인하여 강도가 저하한다는 점 등으로 볼 수 있다.

특히 풍화토로 이루어진 사면의 경우에는 풍화의 진행에 따른 사면재료의 강도저하로 인하여 불안정하게 되어 붕괴에 이르는 경우가 많다. 이와 관련하여 건습 전단시험(wetting-drying shear test)을 실시하여 점착력과 전단저항각 등의 강도정수가 건습반복에 의하여 상당히 저하됨을 확인한 바 있다. 그림 3.9은 채취시료의 수침과정을 나타내고 있다. 실험은 3hr, 6hr, 24hr, 48hr 경과 후의 전단강도를 평가하였다.



그림 3.9 시료의 수침과정

본 실험에서는 포항시 이암을 대상으로 건습반복 직접전단시험을 실시하여 건습반복에 따른 전단강도의 변화특성을 분석하였다.

- ① 시료의 단위 중량 및 함수비를 체크한다.
- ② 준비된 시료에 컷링을 놓고 시료가 교란되지 않도록 수직으로 조심스럽게 내부로 밀어 넣는다.
- ③ 컷링을 직경 6.35cm×높이 2.0cm의 전단상자에 놓고 삽입원판을 사용하여 밀어 넣는다.
- ④ 전단상자에 설치된 공시체 위에 여과지, 다공질판 및 가압판을 올려놓고 세팅한다.
- ⑤ 수직력 재하장치를 설치하여 소정의 수직하중을 가하여 압밀이 완료된 것을 확인한다. 본 연구에서는 수직하중을 30, 60, 90, 120kPa에 대하여 실시하였다.
- ⑥ 압밀과정이 끝난 후 전단시험은 수평변형률이 시료직경의 15%인 10mm까지 전단하였다.
- ⑦ 전단이 끝난 후 전단파괴가 일어난 시료에 수직력을 제거하고 물을 부어 6시간동안 수침시켜 포화시킨 후 물을 배수하여 다시 6시간동안 건조시킨다.
- ⑧ 상기의 과정을 시간을 24시간, 48시간 변화시켜가며 반복 실험한다.

## IV. 결과분석 및 고찰

### 4.1 XRD 시험결과

시험은 현장에서 채취한 시료를 대상으로 분석하였으며 실험결과 규산염 광물이 63.2%, 점토광물이 36.8%로 규산염광물의 함량이 다소 높게 함유되어 있는 것으로 나타났다.

표 4.1 XRD시험 결과

규산염 광물(%)			점토광물(%)	
석 영	사장석	정장석	백운모+ 일라이트	녹니석
49.4	13.8	-	27.8	9.1

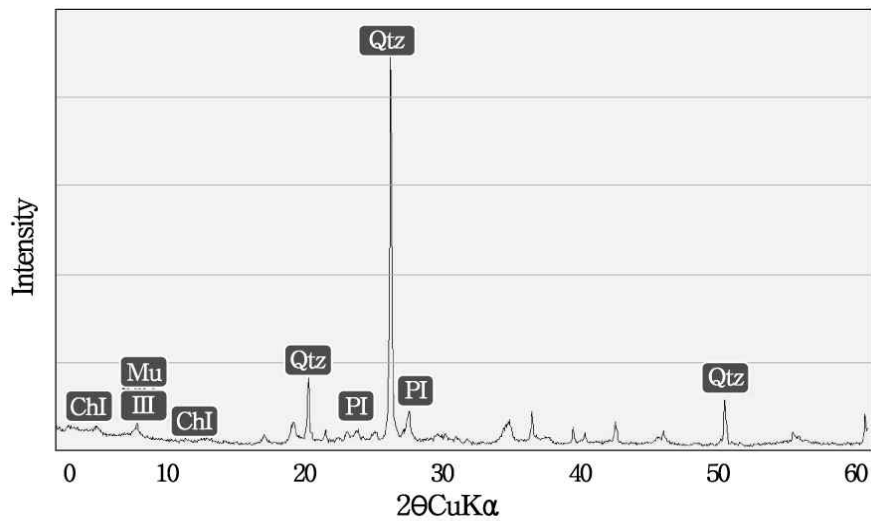


그림 4.1 XRD시험 결과

## 4.2 팽창성 실험 결과

팽창성 시험은 원주상의 공시체를 공시체 축에 일치하도록 측정점을 정하고 지압판 및 변위계를 설치한 후 공시체가 수침될 때까지 Cell에 물을 채우고 변화량이 일정할 때까지 시간경과에 따른 변위를 측정할 후 흡수팽창율을 식 4.1과 같이 산정하였다.

$$I = d / L \times 100(\%) \quad (4.1)$$

여기서, d : 최대팽창량

L : 초기 길이

본 실험에서 수행한 팽창시험특성은 ISRM에서 제시한 팽창 변형률 시험지침에 준하여 실시하였다. 그러나 본 현장에서 채취한 블록샘플을 이용한 관계로 초기 팽창압력을 측정하지 못하였다.

실험 결과 20시간 이내에 급속한 증가를 보이다가 그 이후에는 증가 속도가 점진적으로 둔화되었으며 팽창변형률은 축방향으로 0.066%, 측면방향으로 0.021 ~ 0.036%인 것으로 나타났다. 또한 팽창변형률 속도는 20 ~ 30시간까지 팽창속도가 매우 빠르고 그 이후로는 비교적 완만한 증가경향을 나타내고 있다. 실험결과를 정리하면 표 4.2와 같다.

표 4.2 Swelling 실험 결과

Direction	Displacement (mm)						Swelling strain index (%)
	0	10	20	30	40	50	
Axial	0.000	0.045	0.060	0.067	0.067	0.067	0.066
Lateral 1	0.000	0.010	0.018	0.019	0.019	0.019	0.036
Lateral 2	0.000	0.008	0.011	0.011	0.011	0.011	0.021

Direction	Displacement (mm)						Swelling strain index (%)
	60	70	80	90	94	100	
Axial	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.066
Lateral 1	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.036
Lateral 2	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.021

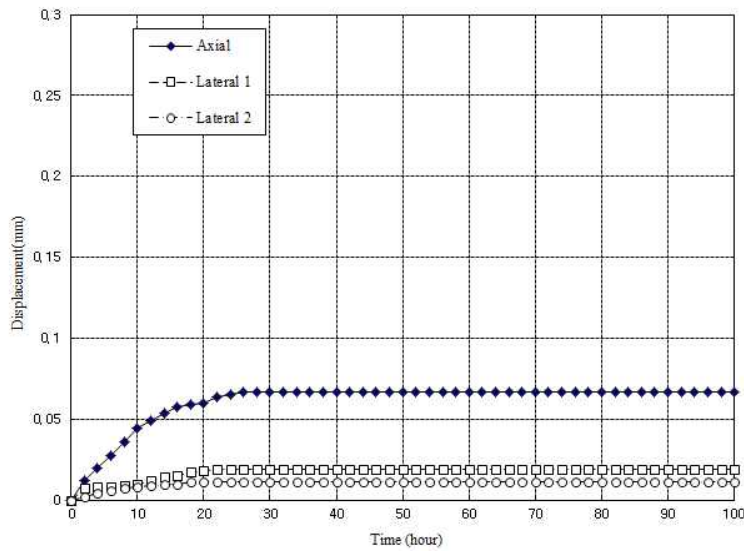


그림 4.2 팽창성 시험 결과

### 4.3 Slaking 실험 결과

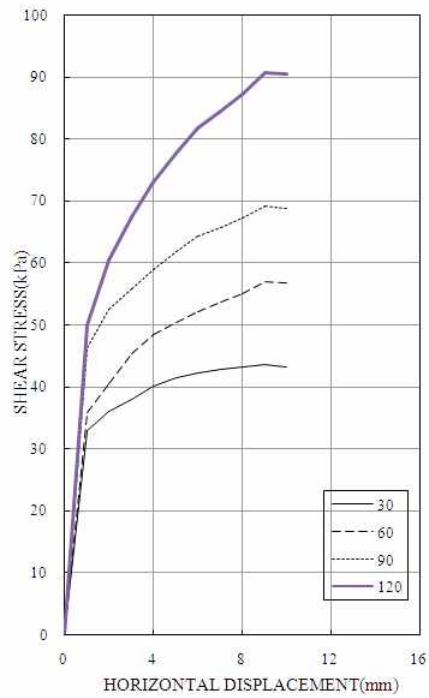
Slaking 실험결과, 1차 내구성지수는 25.6%, 2차 내구성 지수는 19.7%로 나타나 Gamble(1971)에 의해 제안된 기준에 비교하여 볼 때 극히 낮은 내구성을 보이는 것으로 나타났으며, Franklin(1972)에 의한 암석의 내구성 정도를 나타내는 내구성 지수에 따라 분류하면 Very low durability를 나타내는 것으로 분석되었다. Slaking 실험결과를 정리하면 표 4.3과 같다.

표 4.3 Slaking 실험 결과

Specimen ID.	Rock Type	Depth (m)	Initial Dried Weight(gf)
NH-1	mudstone	16.0~20.0m	501.23
Dried Weight After 1st Cycle(gf)		1st Slake Durability Index(%)	
128.15		25.567	
Dried Weight After 2nd Cycle(gf)		2nd Slake Durability Index(%)	
98.56		19.664	

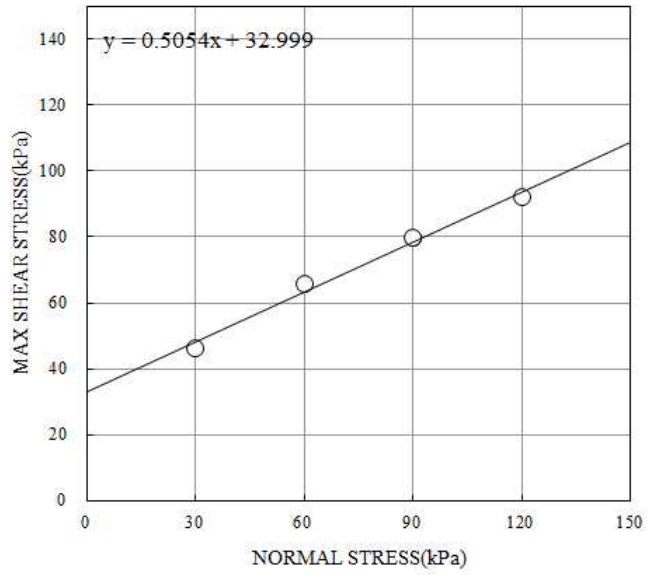
#### 4.4 자연상태에서의 직접전단시험

직접전단시험은 2개소의 불교란 시료를 채취하여 실시하였으며 실험 결과는 그림 4.3~4.4와 같다. 실험결과 전단강도 정수 중 전단저항각은  $26.8 \sim 27.0^\circ$ 이며, 점착력은  $26.9 \sim 33.0\text{kPa}$ 의 범위에서 형성되는 것으로 나타났다.



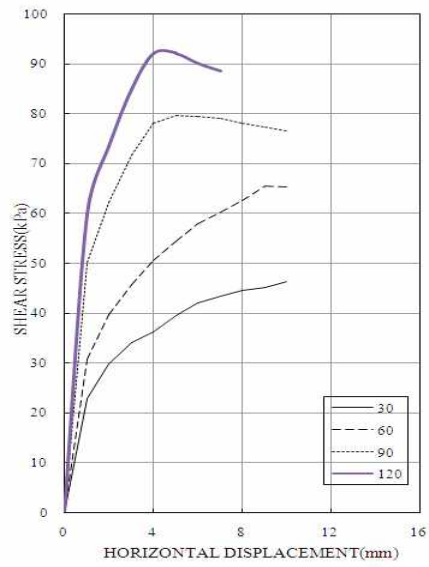
(a) 전단응력-수평변위 관계



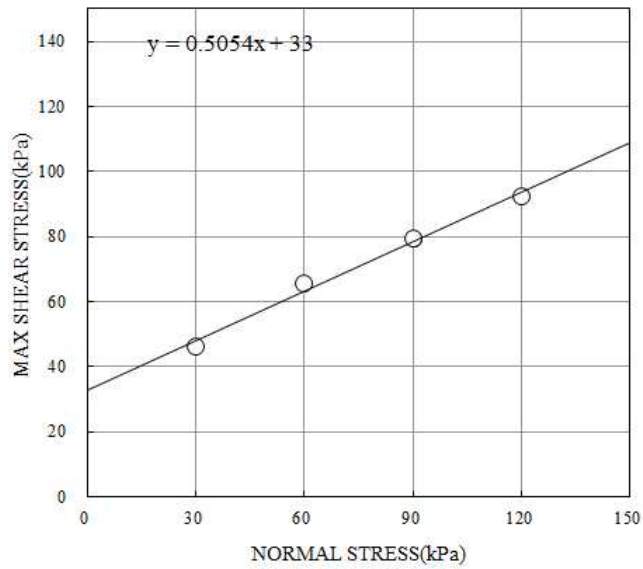


(b) 점착력과 전단저항각

그림 4.3 직접전단실험 결과(Test 1)



(a) 전단응력-수평변위 관계



(b) 점착력과 전단저항각

그림 4.4 직접전단실험 결과(Test 2)

#### 4.5 잔류강도 시험결과

일반적인 직접전단시험에서의 변위량으로 잔류강도를 측정할 수 있는 것을 고려하여 역전직전단시험을 실시하였으며, 실험에서 이암잔적토에 대한 잔류강도시험결과를 나타내면 표 4.4와 같다. 실험결과 수평변위가 증가함에 따른 전단강도의 감소경향을 보여주고 있다. 또한 전반적으로 수평변위량이 20mm이상의 변위에서 잔류강도가 형성되는 것으로 분석되었다.

그림 4.5 ~ 4.6은 잔류강도 실험결과를 통해 산정된 전단정수를 나

타낸 것으로 침투강도의 경우 점착력은 26.9 ~ 33.0kPa, 잔류강도의 경우 점착력은 15.2 ~ 18.9kPa로 나타나, 최대 14.1kPa의 차이가 발생하며 침투강도에 비해 평균 43%정도 감소되는 것으로 나타났다. 전단저항각의 경우에는 침투강도가 26.8 ~ 27.0°인데 반해서 잔류강도의 경우 25.3 ~ 26.5°로 나타나 최대 1.7°의 차이가 발생하며 침투강도에 비해 평균 4% 감소되는 것으로 나타났다.

잔류강도 분석결과 비교적 침투강도와 잔류강도의 차이가 큰 것으로 나타났으며, 강도정수 중 점착력의 감소폭이 상대적으로 큰 것으로 분석되었다.

[표 4.4] 잔류강도실험 결과

	PEAK SHEAR STRENGTH PARAMETERS		RESIDUAL SHEAR STRENGTH PARAMETERS	
	C(kPa)	$\phi(^{\circ})$	C(kPa)	$\phi(^{\circ})$
Test 1	26.85	27.0	15.16 kPa	25.3 °
	33.00 kPa	26.8 °	18.92 kPa	26.5 °

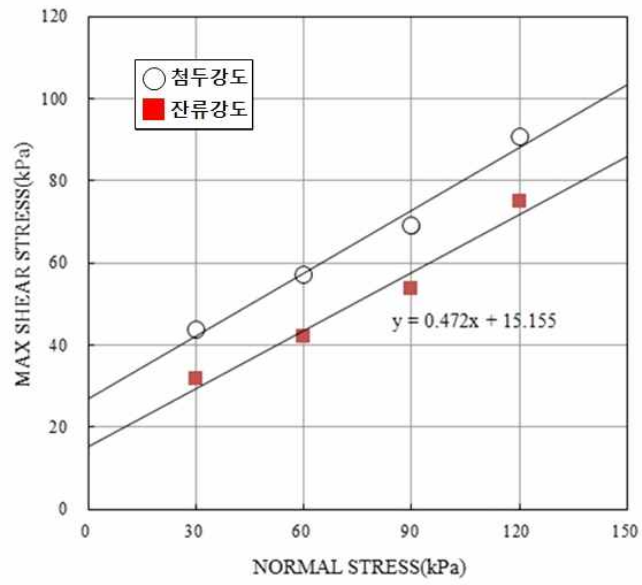


그림 4.5 잔류강도를 이용한 지반정수(Test 1)

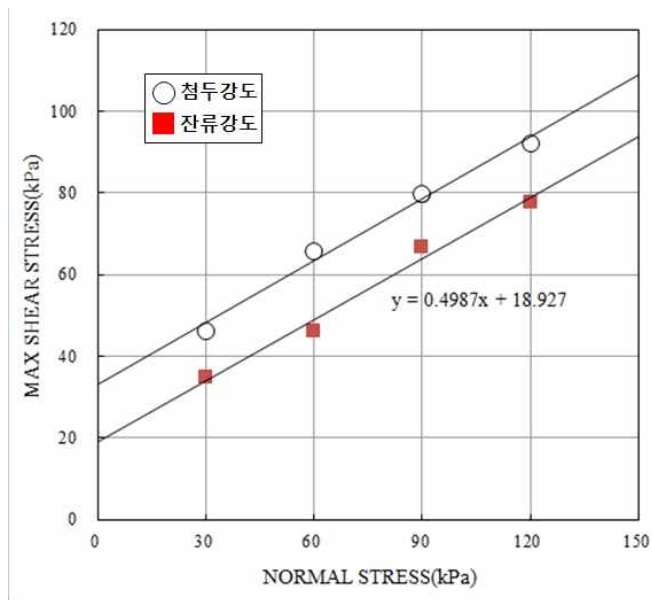


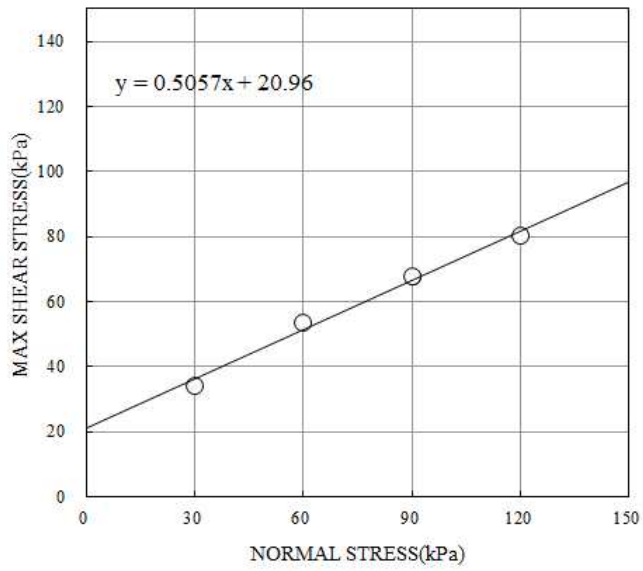
그림 4.6 잔류강도를 이용한 지반정수(Test 2)

#### 4.6 수침에 따른 강도시험

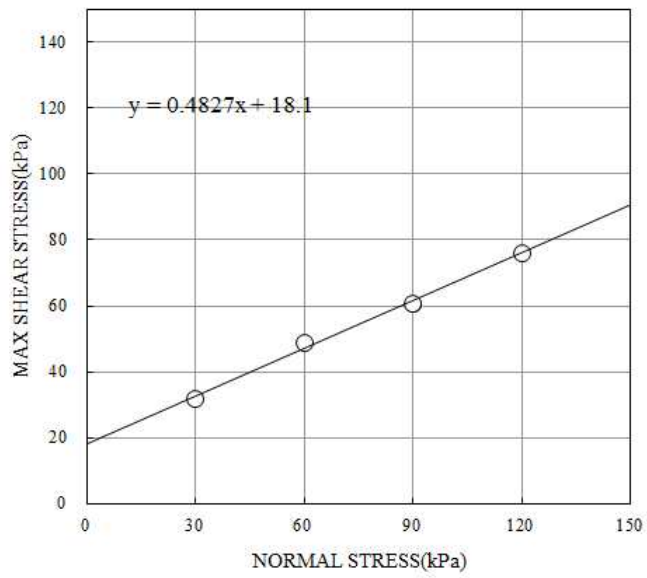
수침에 따른 강도시험 결과 수침기간이 증가할수록 전단강도가 감소하는 것으로 나타났으며, 초기 하중에서 수침기간이 증가할수록 발생 변위가 커지는 경향으로 나타났다. 특히 강도정수는 무 수침시 점착력은 26.9kPa, 전단저항각은 27°이지만 6시간 수침 시 점착력은 21.0kPa, 전단저항각은 26.8°, 12시간 수침 시 점착력은 18.1kPa, 전단저항각은 25.8°, 48시간 수침 시 점착력은 17.7kPa, 전단저항각은 25.4°로 나타나 6시간경과 시 상당량의 전단강도 감소가 발생하는 것으로 나타났으며, 수침이 길어질수록 지반의 잔류강도에 근접해가는 양상을 보이고 있다.

[표 4.5] 수침에 따른 강도실험 결과

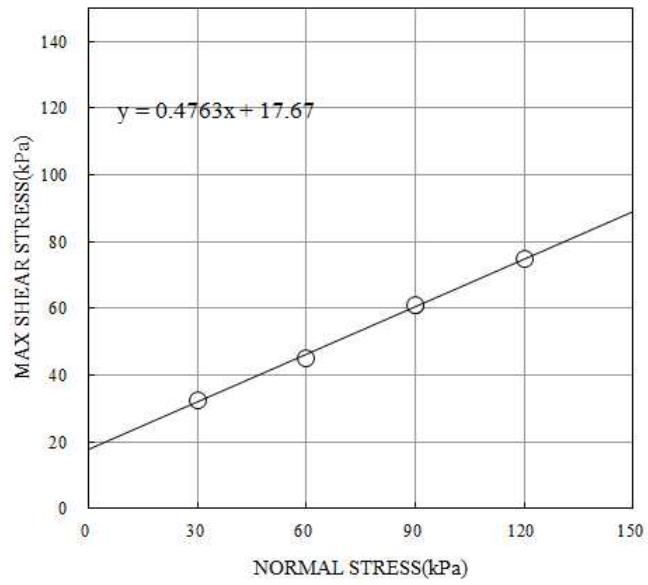
Time(hr)	강도정수	
	0	C(kPa)
$\phi(^{\circ})$		27.0 °
6	C(kPa)	20.96kPa
	$\phi(^{\circ})$	26.8 °
24	C(kPa)	18.10kPa
	$\phi(^{\circ})$	25.8 °
48	C(kPa)	17.67kPa
	$\phi(^{\circ})$	25.4 °



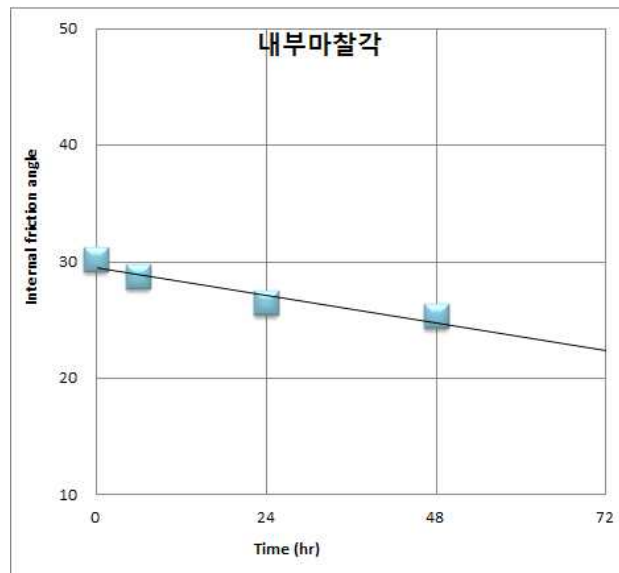
[그림 4.7] 수침에 따른 전단강도(6시간)



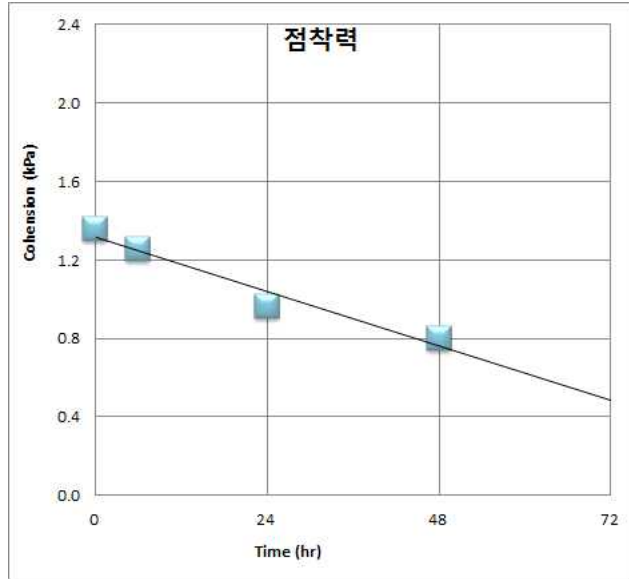
[그림 4.8] 수침에 따른 전단강도(24시간)



[그림 4.9] 수침에 따른 전단강도(48시간)



[그림 4.10] 수침에 따른 전단저항각 변화



[그림 4.11] 수침에 따른 점착력 변화



## V. 결 론

이암이 분포하는 구간의 경우, 다짐이나 교결작용, 재결정화작용이 완전하게 이루어지지 않아 침식과 같은 풍화에 취약하여 풍화에 따른 강도감소 특성이 반드시 고려되어야 한다. 이에 본 연구에서는 실내 시험을 통하여 장기적인 물성치의 강도저감특성을 예측하고 이를 안정성해석을 위한 설계정수에 반영함으로써 구조물의 장기적인 안정성을 확보하는데 기초자료를 제공하고자 하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) X-선 회절분석결과 규산염 광물이 63.2%, 점토광물이 36.8%로 점토광물의 함량이 다소 높게 함유되어 있는 것으로 나타났다.
- 2) 팽창성은 20시간 이내에서 급속한 증가를 보이다가 그 이후에는 증가속도가 점진적으로 둔화되었으며, 팽창변형률은 축방향으로 0.066%, 측면방향으로 0.021 ~ 0.036%인 것으로 나타났다.
- 3) Slaking 실험결과, 1차 내구성지수는 25.6%, 2차 내구성 지수는 19.7%로 나타나 Gamble에 의해 제안된 기준에 비교하여 볼 때 극히 낮은 내구성을 보이는 것으로 나타났다.
- 4) 전단강도 실험결과 첨두강도의 경우 점착력은 26.9~33.0kPa, 전단

저항각의 경우  $26.8 \sim 27^\circ$ 인데 반해서 잔류강도의 경우 점착력은  $15.2 \sim 18.9\text{kPa}$ , 전단저항각의 경우  $25.3 \sim 26.5^\circ$ 로 나타나 비교적 침투강도와 잔류강도의 차이가 큰 것으로 분석되었다.

- 5) 수침기간에 따른 전단강도 실험결과 수침기간이 증가할수록 전단강도가 감소하며, 지반의 잔류강도에 근접해가는 양상을 보였다. 또한 48시간 경과 후 점착력은  $17.67\text{kPa}$ , 전단저항각은  $25.4^\circ$ 로 수침을 하지 않은 시료에 비해 점착력은 34%, 전단저항각은 6%정도 감소하는 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부(2003), 구조물 기초설계기준 해설, pp. 277-378.
2. 강한욱, 곽현준, 정한중, 김영근(2001), “이암의 공학적 특성과 이암층에  
서의터널시공사례”, 한국터널공학회지 터널기술, Vol.3 No.4 99~113.
3. 김광식,김교원(2003), “포항분지 제3기 두호층 이암의 크리프 거동”, 지  
질공학회, vol.13, No.2, pp.227~238.
4. 김영수(2002), “세일의 이방성 파괴 특성”, 한국지반공학회지, 제 17권 2  
호, pp.13~20
5. 김영수, 김병탁, 이상웅, 김대만(1997), “이암 풍화토지반에 관입된 강관  
단일말뚝의 수평거동 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집.
6. 서울대학교 에너지 자원 신기술연구소(1994), “포항지역 이암의 Creep  
특성에 관한 연구 보고서”, pp. 1~100.
7. 엄상호, 이동우, 박봉순(1964), “한국지질도 포항도폭 및 설명서, 국립지  
질조사소.
8. 영남대학교 토목공학과(2005), “포항 영일만 신항개발(1-1단계) 민간투  
자사업 중 매립재로서의 이암의 공학적 특성보고서”, pp.1~80.
9. 이승재, 노상림, 윤지선(2001), “포항지역- Mudstone 및 대구지역  
-BlackShale의 물리 , 역학적 특성에 관한 연구”, 한국자원공학회지,  
Vol 38, No.4,pp.310~315.
10. 이영휘(1996), “포항이암층의 슬레이킹, 팽창 및 전단강도특성”, 한국지

- 반공학회논문집, Vol. 12, No. 2, pp.33-42.
11. 이영희, 우문정, 정운태(1993), “포항이암의 Slaking 및 팽창특성” 한국지반공학회 사면안정위원회 학술발표회집 제2집, pp.153~166
  12. 이유대(1988), “한국 포항분지 신 제3기층의 연구”, Jour. Geol. Soc. Korea, 24, pp.16~30.
  13. 윤지선(1991), “암석, 암반의 조사와 시험”, 구미서관.
  14. 정태중(1996), “의성 소분지에 분포하는 백악기 사암의 크리프 시험”, Jour, Korean Earth Science Society, Vol.17, No. 2, pp.109-118.
  15. 이규환, 정대석, 양태선, (2007), “매립체로서 포항지역 이암의 유용성에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집, Vo23 No.8 149~158.
  16. 한국지반공학회 암반위원회 학술세미나 논문집,(2002) “이암/세일의 공학적 특성 및 문제. pp.20~120
  17. 한중환, 광영훈, 손진담(1986), “한국동남부지역 제3기 퇴적분지내의 지체구조발달및퇴적환경연구”. 한국동력자원연구소, 연구보고서 KR-86-(B)-8. pp.76
  18. Franklin, J.A and Chandra, A.(1972), “Slake-durability Test”, Int. J l Rock Mechinics and Mining Science, Vol.9, pp.325-341.
  19. Griggs, D. T.,(1936), “Deformation of rocks under high confining pressure”, J . Geol., 44, pp. 541-577.
  20. Hardy, H. R,(1959), “Time dependent deformation and failure of geological materials”, Proc. 3rd Symp. Rock Mech., Golden, Colo.,

pp.135-175.

21. Hardy, H. R., Jr., Kim, R. Y., Stefanko, R., and Wang, Y. J.,(1970), "Creep and micro-seismic activity in geological materials", Proceedings, 11th Symposium on Rock Mechanics (AIME), pp.377-414.
22. Kaiser P. K, Morgenstern N. R,(1981), "Phenomenological model for rock with time-dependent strength", Int. J . Rock Mech. Mim. Sci., 18, pp.153-165.
23. Maranini, E, Brignoli, M.,(1999), "Creep behaviour of a weak rock : experimental characterization", Int. J . Rock Mech. Mim. Sci., 36, pp.127-138.
24. Mitchell, J.K.(1993), "Fundamentals of Soil Behaviour" , 2nd Ed.,", John Wiley and Sons, Inc., New York.
25. Morgerstern, N.R. and Eigenbrod, K.D.(1974), "Classification of argillaceous soils and rocks", J 1 . Geotech. Div., ASCE, Vol.100, pp1137-1156
26. Okubo, S., Nishimatsu, Y., Fukui, K.,(1991), "Technical note complete creep curves under uniaxial compression", Int. J . Rock Mech. Mim. Sci., pp.77-82.
27. Overt, L.,(1967), "Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock", John wiley and Sons Inc., New York, pp.293~301.

28. Penny, R. K., Marriott, D. L.,(1995), Design for creep, Chapman & Hall.
31. Richardson, D.N. and Long, J.D.(1987), "The sieved slake durability test", Bull. Assoc. Eng. Geol., Vol.24, pp.247~258.
29. Van Eeckhout, L.V(1976), "The mechanisms of strength reduction due to moisture in coal mine shales", Int. J l Rock Mechanics and Mining Science, Vol.13, pp.61~67.

## Abstract

One of the current issues in the field of constructions is the design and construction in shale floors. Shale floors are very sensitive in weathering, and are expanded if containing water. Due to such slaking phenomena, there are many cases of damage on the structure constructed on the clay rock areas due to an issue of ground subsidence.

Furthermore, if cemented clay rocks and uncemented clay rocks are mixed depending on the location and depth, engineering characteristics of them are very complicated. Mudstone layer by the diagenesis in clay rocks are classified into hard rock, soft rock, weathered rock, and weathering soil depending on the degree of weathering.

On the other hand, uncemented sedimentary rocks represent characteristics of rocks and sediments at the same time as lithification stops due to soil arching when sedimentary rocks are being converted to rocks. Uncemented sedimentary rock layers are weak against weathering such as erosion as cementing reaction or recrystallization process is not completely finalized. In addition, as a supporting layer of the structure, Uncemented sedimentary layer represents a similar strength parameter with soft rock. However, when they are exposed to the surface of the earth, durability of them is evaluated to be lower than the one of weathered rock.

As for design and construction of a structure, it is in reality that

ground is investigated, indoor experiment is conducted, and ground strength parameter is applied without considering the reduction of intensity due to weathering. If proceeding design and construction in the use of ground strength parameter evaluated when investigating the stability on the shale floor, rapid changes in intensity from time lapse cannot be considered. Especially, as ground is exposed, there can be various issues in safety from reduction of intensity if time passes by, or if drying or humidifying conditions are frequently changed. Therefore, it is required to clarify intensity characteristics from weathering as well as weathering characteristics of clay rocks for the foundation of a structure on the ground where clay rocks are distributed, cutting or filing of ramp, and utilization of resources on the ramp.

Hereupon, it was intended to collect resources from clay rocks areas in the form of undisturbed soil and evaluate characteristics of reduced intensity on the ground for a long-term perspective by conducting indoor experiment. According to the results of research, there was a huge difference between peak intensity and retained strength of the shearing strength. As the water pillow period increased, a significant amount of shearing strength was reduced. Therefore, it has been analyzed that strength reducing effect needed to be considered when calculating ground parameter.



## 감사의 글

인생을 살면서 제가 살아온 삶을 돌아보니 저에게 있어 학위과정의 길은 학문의 길 보다는 어쩌면 더 큰 교훈을 얻었던 과정에 가깝지 않았나 싶습니다. 이제 비로소 석사 논문의 모든 과정을 마치고 논문의 마지막 마무리를 글로 남겨보려 합니다.

석사학위 논문 심사를 마칠 때까지 폭 넓고 많은 관심과 격려로 늘 변함없이 따뜻하게 지도해 주신 이봉직 교수님의 정성어린 지도에 깊은 감사를 드리며, 그 고마운 뜻을 오래 간직하겠습니다. 또한 논문심사과정에서 아낌없는 지도로 많은 가르침을 주신 신계종 심사위원장님, 엄대용 교수님, 논문이 완성될 때까지 연구방향에 대해 많은 도움을 주신 이종규 교수님, (주)진산이엔지 윤준식 사장님을 비롯한 토목공학과 모든 교수님들께도 고개 숙여 깊은 감사를 드립니다.

한국교통대학교 대학원에 입학한 것이 엇그제 같은데 벌써 졸업을 준비하게 되었습니다. 직장생활과 학업을 병행하는 일이 결코 쉽지는 않았지만 뒤통지 지 않고 무사히 졸업을 할 수 있게 된 것을 뒤돌아보면 그동안 저를 도와준 많은 고마운 분들이 계셨다는 것을 다시금 생각나게 합니다. 부족한 제가 마음 편히 학업을 병행할 수 있도록 여러 가지로 배려해 주신 전만경 청장님, 허용 국장님, 박찬현 과장님께 깊은 감사를 드립니다.

끝으로 언제나 한결같이 묵묵히 내조해준 아내 신민정과 내 인생의 보배 아들 박민규, 박연규에게 이 작은 기쁨을 바칩니다. 그리고 항상 사랑과 관심을 가져 주시는 장모님과 부족한 아들의 성공을 위해 걱정과 격려 해주시는 부모님의 사랑이 아니었으면 제가 오늘 이 자리에 없었을지

도 모릅니다.

‘꿈, 세상을 살아가는데 복잡하고, 어려운 전략만이 필요한 것은 아니다. 어쩌면 인생을 사는 최고의 생존전략은, 실낱같은 꿈 하나를 가슴 깊이 심어두는 것이다. 가슴에 심은 꿈은, 아무도 뽑을 수 없다. 그 꿈을 심는 사람도 당신이고, 뽑는 사람도 당신이기 때문이다.’

이러한 말이 있듯이 논문을 쓰면서 저희는 꿈을 꾸었고, 졸업을 한 뒤에도 그 꿈을 실현시키기 위해서 저희는 앞만 보고 달릴 것입니다. 그리고 가끔 뒤를 돌아봤을 때 저희가 감사하게 생각했던 분들이 더 잘되고, 좋은 일만 가득하기를 기도할 것입니다. 논문을 완성하면서 희망과 꿈을 가슴에 담았습니다. 그리고 도움을 주셨던 여러분들 또한 가슴에 담았습니다. 이것을 밑바탕으로 고마웠던 분들을 항상 생각하며 살 것입니다. 다시 한 번 정말 감사합니다. 그리고 사랑합니다.