



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](#)

2022년 8월

박사학위논문

# 호남지역 산사태의 토질특성 및 원인분석에 관한 연구

조선대학교 대학원

토목공학과

정찬욱

# 호남지역 산사태의 토질특성 및 원인분석에 관한 연구

**A Study on Soil Properties and Cause Analysis of Landslides in  
Honam Region**

2022년 8월 26일

조선대학교 대학원

토목공학과

정찬욱

# 호남지역 산사태의 토질특성 및 원인분석에 관한 연구

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함

2022년 4월

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

정 찬 욱

정찬욱의 박사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김 성 홍 (인)

위 원 조선대학교 교수 박 정 응 (인)

위 원 조선대학교 교수 장 우 식 (인)

위 원 조선이공대학교 교수 박 경 호 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 대 현 (인)

2022 6

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구배경과 목적 .....	1
1.2 연구동향 .....	3
1.3 연구내용 및 실험방법 .....	6
제 2 장 이론적 배경 .....	7
2.1 우리나라 산사태의 특성 .....	7
2.2 산사태 발생 메커니즘 .....	11
2.3 강우 .....	13
2.4 불포화토의 기본이론 .....	17
2.4.1 불포화 토질역학 .....	17
2.4.2 불포화토의 역학적 특성 .....	23
2.4.3 불포화토의 수리학적 특성 .....	28
2.5 강우침투 .....	35
2.6 사면안정 해석 .....	38
제 3 장 연구지역의 산사태 특성 .....	41
3.1 개요 .....	41
3.2 연구지역의 지형 및 지질, 임상특성 .....	42
3.2.1 지형 및 지질특성 .....	42

3.2.2	임상특성 .....	50
3.3	연구지역의 강우특성 .....	53
3.4	연구지역의 산사태 현장조사 결과 .....	57
3.5	연구지역의 토질특성 .....	61
3.5.1	물리적 시험결과 .....	63
3.5.2	역학적 시험결과 .....	66
3.5.3	지질별 산사태지역의 토질특성 .....	69
제 4 장	지반정수 산정모델 개발 .....	70
4.1	개요 .....	70
4.1.1	상관성 분석 .....	72
4.1.2	회귀분석 .....	75
4.1.3	적용 통계프로그램 .....	77
4.2	전단강도 산정모델 .....	78
4.2.1	화강암 토층의 점착력 산정모델 .....	79
4.2.2	화강암 토층의 내부마찰각 산정모델 .....	83
4.2.3	편마암 토층의 점착력 산정모델 .....	86
4.2.4	편마암 토층의 내부마찰각 산정모델 .....	89
4.3	지반정수 산정모델의 유효성 검증 .....	92
4.3.1	화강암 토층의 점착력 산정모델 검증 .....	94
4.3.2	화강암 토층의 내부마찰각 산정모델 검증 .....	96
4.3.3	편마암 토층의 점착력 산정모델 검증 .....	98
4.3.4	편마암 토층의 내부마찰각 산정모델 검증 .....	100
제 5 장	산사태 수치해석 .....	102
5.1	침투 및 사면안정 해석 .....	102

5.2	지반조사 결과 .....	107
5.3	산사태 시나리오별 수치해석 결과 .....	115
5.3.1	침투해석 결과 .....	115
5.3.2	사면안정해석 결과 .....	120
제 6 장	결론 .....	125
참고문헌	.....	127

## 표 목 차

표 3.1 구간에 따른 경사각 .....	45
표 3.2 연구지역 토층시료의 지반정수 .....	69
표 4.1 상관성분석에서 상관계수 R에 따른 상관관계 .....	73
표 4.2 SPSS 통계프로그램의 여러 가지 기능 .....	77
표 4.3 화강암 토층의 점착력과 토질물성 간의 상관계수 및 유의도 .....	79
표 4.4 화강암 토층의 회귀분석에 의한 점착력 모형요약 결과 .....	80
표 4.5 화강암 토층의 회귀분석에 의한 점착력 분산분석 결과 .....	80
표 4.6 화강암 토층의 회귀분석에 의한 점착력 모델분석 결과 .....	80
표 4.7 화강암 토층의 내부마찰각과 토질물성 간의 상관계수 및 유의도 .....	83
표 4.8 화강암 토층의 회귀분석에 의한 내부마찰각 모형요약 결과 .....	84
표 4.9 화강암 토층의 회귀분석에 의한 내부마찰각 분산분석 결과 .....	84
표 4.10 화강암 토층의 회귀분석에 의한 내부마찰각 모델분석 결과 .....	84
표 4.11 편마암 토층의 점착력과 토질물성 간의 상관계수 및 유의도 .....	86
표 4.12 편마암 토층의 회귀분석에 의한 점착력 모형요약 결과 .....	87
표 4.13 편마암 토층의 회귀분석에 의한 점착력 분산분석 결과 .....	87
표 4.14 편마암 토층의 회귀분석에 의한 점착력 모델분석 결과 .....	87
표 4.15 편마암 토층의 내부마찰각과 토질물성 간의 상관계수 및 유의도 .....	89
표 4.16 편마암 토층의 회귀분석에 의한 내부마찰각 모형요약 결과 .....	90
표 4.17 편마암 토층의 회귀분석에 의한 내부마찰각 분산분석 결과 .....	90
표 4.18 편마암 토층의 회귀분석에 의한 내부마찰각 모델분석 결과 .....	90
표 5.1 탐사측선 전개 .....	109
표 5.2 해석에 사용된 지반정수 .....	113
표 5.3 강우강도에 따른 안전율 .....	124

## 그림 목 차

그림 2.1	형태에 따른 산사태의 분류 .....	10
그림 2.2	사면붕괴에 따른 복구비용 및 피해면적 .....	14
그림 2.3	사면붕괴와 강우강도(연속강우)와의 상관성 .....	15
그림 2.4	강원도 지역의 강우강도와 토석류 산관성 .....	16
그림 2.5	토질역학의 분류 .....	17
그림 2.6	지표침투에 대한 경계조건 .....	18
그림 2.7	유체상의 특성에 대한 지반상태 .....	19
그림 2.8	불포화토의 4상 구조 .....	19
그림 2.9	불포화토의 4상 및 3상 관계 .....	20
그림 2.10	불포화토에서 변형된 Mohr-Coulomb의 파괴 포락선 .....	24
그림 2.11	유효응력계수와 모관흡수력의 관계 .....	25
그림 2.12	실트질 토사의 함수 특성 곡선 .....	29
그림 2.13	흙의 종류에 따른 함수특성곡선의 유형 .....	29
그림 2.14	변수값 변화에 따른 함수특성곡선의 형태 .....	32
그림 2.15	p-q면에서의 Mohr-Coulomb 파괴규준으로부터의 함수응력특성 곡선 ...	34
그림 2.16	강우시 습윤대의 형성 .....	35
그림 2.17	강우로 인해 발생하는 사면의 붕괴 원인 .....	36
그림 2.18	한계평형 해석법에서 절편에 작용하는 힘 .....	39
그림 3.1	A지역 산사태 지형도 .....	42
그림 3.2	재해전 유로 .....	43
그림 3.3	도로 하부의 비탈면 방향 .....	44
그림 3.4	중평면도 .....	44
그림 3.5	A지역 지질도 .....	46
그림 3.6	A지역 기반암인 화강암류 .....	46
그림 3.7	B지역 산사태 지형도 .....	47
그림 3.8	산사태 주변 경사분포도 .....	48
그림 3.9	B지역 지질도 .....	49
그림 3.10	A지역 임상 특성 .....	51

그림 3.11 B지역 임상 특성 .....	52
그림 3.12 A지역 강수량 분석 .....	54
그림 3.13 B지역 강수량 분석 .....	56
그림 3.14 A지역 산사태 현장조사 .....	58
그림 3.15 B지역 피해지역 토석류 유하거리 .....	59
그림 3.16 B지역 산사태 현장조사 .....	60
그림 3.17 산사태 지역에서의 현장조사 .....	62
그림 3.18 연구지역 토층시료의 지질별 입도분포도 .....	63
그림 3.19 연구지역 토층시료의 지질별 액소성한계 .....	64
그림 3.20 연구지역 토층시료의 지질별 간극률 및 건조단위중량 .....	65
그림 3.21 연구지역 토층시료의 지질별 투수계수 .....	67
그림 3.22 연구지역 토층시료의 지질별 전단강도 .....	68
그림 4.1 상관성분석에서 일반적인 상관관계 그래프 .....	73
그림 4.2 회귀분석에서 최소자승선의 분포 .....	75
그림 4.3 전단강도 산정모델 개발을 위한 흐름도 .....	78
그림 4.4 화강암 지역의 직접전단시험에 의한 점착력과 산정모델에 대한 검증 .....	95
그림 4.5 화강암 지역의 직접전단시험에 의한 내부마찰각과 산정모델에 대한 검증 .....	97
그림 4.6 편마암 지역의 직접전단시험에 의한 점착력과 산정모델에 대한 검증 .....	99
그림 4.7 편마암 지역의 직접전단시험에 의한 내부마찰각과 산정모델에 대한 검증 .....	101
그림 5.1 A지역 산사태 발생 현황 .....	102
그림 5.2 A지역 산사태 발생 예상 구간 분석 .....	103
그림 5.3 시나리오 1 해석단면 - 상부 도로부 사면파괴 .....	105
그림 5.4 시나리오 2 해석단면 - 계단식 옹벽 상부 내지 하부 사면파괴 .....	106
그림 5.5 시나리오 3 해석단면 - 계곡부 전체 활동파괴 .....	106
그림 5.6 지반조사 위치도 .....	107
그림 5.7 지층단면도 .....	109
그림 5.8 탐사결과 해석단면 Line-1 .....	110
그림 5.9 탐사결과 해석단면 Line-2 .....	111

그림 5.10 탐사결과 해석단면 Line-3 ..... 111

그림 5.11 탐사결과 해석단면 Line-4 ..... 112

그림 5.12 침투해석에 사용된 함수특성곡선과 불포화 투수계수 곡선 ..... 114

그림 5.13 A지역 산사태 시나리오 1 강우별 시간에 따른 침투해석 ..... 116

그림 5.14 A지역 산사태 시나리오 2 강우별 시간에 따른 침투해석 ..... 117

그림 5.15 A지역 산사태 시나리오 3 강우별 시간에 따른 침투해석 ..... 118

그림 5.16 A지역 산사태 시나리오 1 강우별 시간에 따른 사면안정해석 ..... 120

그림 5.17 A지역 산사태 시나리오 2 강우별 시간에 따른 사면안정해석 ..... 122

그림 5.18 A지역 산사태 시나리오 3 강우별 시간에 따른 사면안정해석 ..... 123

그림 5.19 강우강도에 따른 안전율 ..... 124

# ABSTRACT

## A Study on Soil Properties and Cause Analysis of Landslides in Honam Region

Jeong, Chan Wook

Advisor : Prof. Kim, Daehyeon, Ph. D.

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

The purpose of this study was to identify various characteristics of landslides based on large-scale landslides that occurred in the Honam region. The major landslides that occurred on natural slopes were summarized from the geotechnical point of view through accurate analysis of each geological type of soil characteristics related to landslides. In addition, a model that easily calculate the shear strength, which is considered a significant factor influencing landslides, was proposed based on the results of analysis of the characteristics of the ground parameters, which are the main factors of landslides. Finally, the effect of rainfall intensity on landslides was analyzed through infiltration analysis and slope stability analysis for each scenario of large-scale landslide occurrence in the study area according to the change in rainfall intensity conditions.

The soil characteristics of gneiss and granite with different geological conditions were analyzed in regions where landslides were concentrated due to heavy rain, showing different soil properties depending on the geology. It was found that the void ratio and porosity were larger in gneiss soil than in granite soil and that the dry unit weight was larger in the granite soil layer than in the gneiss soil layer.

The correlation among soil properties, permeability coefficient, and shear

strength parameter was analyzed in the soil layer of a natural slope where landslides occurred, and using the correlation equation derived from them, the change in the dependent variable (shear strength) were predicted from the change in the independent variable (basic physical property).

The result of analyzing the correlation with ground parameters using statistical technique showed that the adhesive force, a shear strength had a significant correlation with the fine-grained soil content and the uniformity coefficient and that the internal friction angle had a significant correlation with the void ratio, the uniformity coefficient, and the dry unit weight.

For granite and gneiss soil layers, the models that easily and conveniently estimate the shear strength, which is considered important in a landslide area, only with physical property data that has a significant correlation with the ground parameter were developed (cohesive force calculation model and a shear strength calculation model). The revision and supplementation of the model in the future by adding landslide data and ground parameter data occurring in the Honam region is expected to improve the reliability and accuracy of the current model using statistical analysis under limited conditions.

Infiltration analysis was performed applying 10 mm/hr and severe rainfall intensities (30 mm/hr, 50 mm/hr) that are highly likely to cause landslides, it was found that higher rainfall intensities correlate with the formation and expansion of wet areas, one of the saturated zones of the ground. It was also shown that higher rainfall intensity increased infiltration, which caused saturation of the wet zone and changed the pore water pressure from negative (-) to positive (+) values. All of these results indicate the instability of the slope due to the decrease in shear strength.

A domestic landslide vulnerability map based on a database of ground parameters, stratum conditions, and rainfall intensity that were not considered as landslide triggers is expected to be helpful in landslide forecasting and warning, and to be used as an important basic data for the selection of the expected damage area of the slope.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경과 목적

국내에서는 기후변화로 인하여 과거 강우량을 초과하는 강우가 많이 발생하고 있으며, 자연재해로 인한 인적 및 물적 피해가 지속적으로 증가되고 있다. 특히, 2017년 산사태 취약지역 실태조사 결과, 전남은 강원지역 다음으로 산사태 취약지역이 밀집한 것으로 나타났으며, 최근 10년간 지역별 산사태 피해현황 분석결과, 호남권에서 443건의 산사태 피해로 산사태에 대한 위험성이 높아지고 있다(산림청 2018).

지난 30년간 기상관측소에 관측된 강우자료를 확인해보면, 6~9월 평균 강수량은 1986~1996년대에는 710mm, 1997~2005년대에는 814mm로 매년 증가하였다(이지성 등, 2012). 이러한 강수량의 증가로 사면재해 사망자 수는 전체 자연재해 사망자의 27.1%로 높은 비율을 차지하고 있다(김훈 등, 2012).

자연사면에서 산사태는 대부분 집중호우로 구성물질의 단위체적당 중량이 증가되고 붕괴면의 저항력이 감소되므로 산사태가 발생하기 때문에 강우에 의한 영향이 가장 크다고 할 수 있다(홍원표, 1990). 또한, 강우 외에 산사태 발생 요인으로는 지형, 지질, 토질, 지진 및 식생 등이 있다(Olivier 등, 1994; 조용찬, 2006).

지형의 요소 중 사면의 경사는 사면파괴의 형태를 결정짓기 때문에 산사태 발생 요인으로 매우 중요하며, 지진은 암반 내의 일시적인 강도변화 및 토층의 응집력이 약화되어 산사태가 발생할 수 있다. 그리고 암반을 구성하는 지질에 따라 암반의 풍화, 전단작용, 절리작용, 사면물질의 약해짐, 불리한 불연속면(절리, 엽리, 층리, 부정합, 단층)의 방향 및 투수성 등이 산사태 발생에 영향을 줄 수 있으므로 중요하게 고려되어야 한다(Highland and Johnson, 2004).

산사태의 파괴물질은 사면을 구성하고 있는 물질이라는 점에서 파괴 메커니즘을 분석하는데 매우 중요한 요소이다. 자연사면의 산사태는 대부분이 기반암을 피복하고 있는 상부의 표토층에서 발생하기 때문에 이 표토층을 구성하고 있는 매질 즉, 붕적층의 물리적 및 공학적 특성은 산사태 발생과 관련하여 특히 중요한 의미를 갖는다(Sewell and Fletcher, 2000).

본 연구에서는 호남권에서 발생하였던 대규모 산사태 자료를 토대로 하여 산사태와 관련되는 제반 특징들을 파악하였다. 또한, 지질별로 구분하여 산사태와 관련한

토질특성을 정확하게 분석함으로써 산사태의 주요 인자가 되는 지반정수의 특성을 분석하고 그 결과를 활용하여 산사태에 유의한 영향인자로 간주되는 전단강도를 간편하게 산정할 수 있는 모델을 제안하고자 하였다. 마지막으로 산사태에 가장 큰 영향을 미치는 강우강도 조건을 변경하여 연구 대상지역의 산사태 발생 시나리오별 침투해석 및 사면안정해석으로 강우강도가 사면에 미치는 영향을 분석하였다.

## 1.2 연구동향

산사태는 인간 생활 권역에 피해를 주기 때문에 우리나라뿐 아니라 세계적으로도 많은 연구자들에 의해 연구가 이루어지고 있다. 특히, 토석류 산사태는 홍콩, 대만, 일본과 같이 우리나라와 비슷한 기상조건을 가지는 인접국가에서도 활발히 연구가 진행되고 있다. 토석류 산사태에 관련된 연구들의 연구방법은 다양하지만, 최종 목표는 결국 산사태 피해를 저감하기 위한 기술을 개발하는데 있다. 이 목표를 위해서 산사태 발생지점을 예측하여 산사태 물질의 이동경로를 추정하고, 이와 동시에 산사태 물질의 체적을 계산하여 피해범위를 산정하는 연구들을 수행하고 있다. 이러한 연구결과가 인간 생활권역의 피해를 최소화하기 위한 저감시설들을 적재적소에 설치할 수 있는 기준이 되기 때문이다.

산사태는 사면지역의 지형학적, 지질학적 및 지반공학적 특성에 따라서 그 형태, 규모 및 발생빈도 등이 다르게 나타날 수 있다. 국내 산사태는 대부분 붕적토, 충적토 및 잔류토 등의 미고결 층 즉, 강우로 인한 단위중량 증가, 간극수압 상승, 표면 침식 등에 의하여 발생하여 토석류 산사태에 해당한다. 이와 같이 토석류 산사태의 발생위치는 생활권과 떨어져 있고 소규모이나, 산사태 물질은 대부분 모래 입자보다 큰 암편으로 구성되어 있으며, 빠른 속도로 사면하부로 이동하므로 사면하부에 큰 피해를 줄 수 있다(채병곤 등, 2005).

표토는 지중의 풍화되지 않은 기반암 상부로부터 지표면까지 풍화된 모든 재료를 나타내는데 사용되는 일반적인 용어로서, 기반암으로부터 직접적으로 형성되어 현장에 그대로 풍화되어 퇴적된 재료와 기반암 및 다른 표토로부터 이동된 재료를 포함한다. 따라서 표토는 암설, 화산재, 빙하쇄설층, 충적층, 식물 축적물 및 토양을 포함한다. 자연사면을 구성하는 물질 중 암반의 상부에 위치한 층을 표토층이라 하며, 토층의 특성을 분석하기 위해서는 실내실험이나 현장실험의 토질실험결과가 필요하다.

토층에서 발생하는 산사태는 토층 물질의 토질특성과 직접적으로 관계가 있다. 특히, 우리나라와 같이 집중호우로 인해 발생하는 산사태는 토층의 기본적인 물성들 외에 밀도, 간극, 전단강도와 같은 공학특성과 관련되므로 다양한 시험방법과 그 결과를 적용방법을 이해하는 것은 중요한 사항이다. 또한, 산사태 발생과 지질조건 및 토질특성의 상관성을 분석하기 위해서는 지질 및 토층 분포의 특성을 고려하여

각각의 대표시료에 대한 지반특성을 평가하는 것이 바람직하다.

본 연구와 관련하여 기존에 외국에서 수행되었던 자연사면 산사태의 연구 동향을 살펴보면, Mathewson 등(1990), Sitar 등(1992), Brand(1981) 등은 강우로 인한 산사태는 증가된 간극수압과 침투력에 의해 토층의 유효응력과 전단강도가 감소됨으로서 붕괴됨을 보고하였다.

Baldelli 등(1996)은 GIS기법으로 지질도, 지형도 및 수치지형모델 등을 중첩 분석하여 산사태 취약성도를 작성하였으며, Baeza and Corominas(1996)는 사면경사, 경사방향 및 수계영역 등 각종 지형특성과 토지이용이나 암상 등을 이용하여 통계기법에 의한 산사태 취약성평가를 실시하고 산사태 취약성도를 작성한 바 있다. Liener 등(1996)은 수문자료와 토질자료로부터 안전율을 구하고 여기에 지형자료를 중첩 분석함으로써 산사태 위험지수를 평가할 수 있음을 보고한 바 있다. 그리고 Turrini and Visintainer (1998)는 산사태와 관련된 여러 인자들을 이용하여 GIS 중첩방법으로 산사태 예측도를 작성하였다.

인공신경망 기법은 패턴 인식 및 분류에 사용되는 비선형 학습 모델이며 최근 많은 연구자들이 제안하고 있는 방법이다(Ermini 등, 2005; Kanungo 등, 2006; Dou 등, 2015; Shahri 등, 2019)

우리나라에서의 기존 산사태 연구들을 살펴보면, 최경(1986)이 산사태의 유형과 발생요인 및 예지 등에 관한 연구를 수행하였으며, 양승영과 강필중(1987)은 위성영상으로부터 지형, 지질, 지질구조, 암석, 식생 및 표면퇴적물들의 분포 등을 판독함으로써 산사태 지역에서 활용성을 제고한 바 있다.

통계적 방법을 이용한 산사태를 예측하는 연구는 김원영 등(1998, 2003, 2004), 이지성(2018)에 의하여 수행되었는데, 이들 연구는 기 발생된 산사태로부터 산사태에 유의한 지질공학적 인자들을 추출하여 상호관계를 통계적으로 분석하여 산사태 발생을 확률론적으로 예측하였다.

이사로(1999)는 경기도 지역에서 발생한 산사태를 대상으로 지형, 지질, 위치, 토질, 지질구조, 수문, 임상 등 산사태 발생 가능한 요소들을 조사하여 GIS기법으로 산사태 취약성을 분석한 바 있다. 김경수 등(2000)은 경기도 장흥지역을 대상으로 한 지형 및 토질특성을 고려한 산사태 예측 연구에서 로지스틱 회귀모델은 집중호우시 산사태가 발생할 수 있는 지역을 분류하는데 이용이 가능한 것으로 보고하였다.

홍원표와 송영석(2002)은 집중호우로 인한 산사태를 외적 및 내적 요인으로 구분

하고 산사태 발생지역을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 그리고 이사로 등(2005)은 인공신경망기법을 적용하여 강릉지역에서 발생한 산사태의 취약성분석을 수행하였으며, 박혁진과 이정현(2022)는 물리사면모델을 활용한 정량적 산사태 취약성 분석기법과 이아연 등(2021)은 로지스틱 회귀와 인공신경망을 이용한 지역 산사태 취약성 분석을 수행한 바 있다.

김경수 등(2004), 김경수(2005)는 도시지역 사면관리시스템과 연계하여 부산 백양산 지역을 대상으로 한 산사태 예측도 작성에 이를 적용한 바 있으며, 우리나라에서 발생하였던 주요 산사태를 대상으로 연구하여 자연사면의 산사태는 대부분 여름철의 집중호우에 기인되고 유동성산사태의 형태를 보이는 것으로 보고하였다. 그리고 우리나라에서 발생한 자연사면의 산사태를 체계적으로 조사하고 분석할 수 있는 조사분석기법을 개발하였다.

조용찬(2006)은 화강암지역에서 지질구조적 특성을 고려하여 산사태를 예측하는 기법을 제안한 바 있으며, 이문세 등(2008, 2009)은 산사태 지역에서의 토질시험자료를 이용하여 투수계수 및 전단강도를 산정할 수 있는 회귀모델을 개발한 바 있다.

강우와 관련하여 윤찬영 등(2010)은 강원도 지역의 사면재해를 유발하는 강우 특성 분석을 위해 사면재해자료, 강우자료, 산불발생자료를 수집하여 DB를 구축하였다. 김성진 등(2022)은 불포화지반에서의 산사태 3차원 안정성해석에 대한 사례연구를 분석하였다.

그동안의 연구들로 우리나라의 자연사면에서 발생하는 대부분의 산사태는 여름철의 집중호우에 기인되는 것으로 지형조건에 영향을 받으며, 주로 기반암의 상부에 위치한 토층에서 풍화암이나 암편 또는 흙의 붕괴에 의한 것으로 알려지고 있다.

지금까지의 산사태연구는 주로 발생시기의 강우 양상이나 발생지역의 지형조건에 초점이 맞춰져 진행되어 왔다. 반면에 호남권에서 비슷한 시기에 지질조건이 서로 다른 지역에서 집중호우로 인해 발생한 산사태를 대상으로 한 조사 및 시험결과를 통계적으로 분석하여 지형이나 지질 및 토질특성을 산사태와 관련지어 분석한 연구 사례는 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지질조건이 다른 호남권의 2개 지역의 대규모 산사태에 대한 산사태의 주요 인자가 되는 지반정수의 특성을 분석하였고, 통계분석을 통하여 전단강도를 간편하게 산정할 수 있는 모델을 개발하였다.

### 1.3 연구내용 및 실험방법

우리나라에서 집중호우로 인해 발생하는 유동성 산사태를 평가하기 위해서는 강우자료를 바탕으로 지형적인 요소와 함께 사면의 표층을 구성하고 있는 토층 물질의 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구는 연구지역에서 발생한 산사태들을 조사하여 산사태와 관계되는 지반공학적 특징들을 통계적으로 분석하였다. 그리고 지질별로 구분하여 산사태지역에서 토질특성이 지질조건에 따라 어떤 차이점 또는 차별성이 있는지에 관하여 그 상관성을 분석하였다. 또한, 토질 상관성을 분석함과 아울러 각각의 지질별로 토질물성만으로 산사태에 유의한 주요 지반정수 즉, 전단강도를 간편하게 산정할 수 있는 모델을 개발하였다.

본 연구에서 수행된 일련의 연구방법 및 내용은 다음과 같다.

1. 연구지역은 최근 호남권 내 대규모 산사태가 발생하였던 곳으로 선정하였으며, 문헌조사 및 현장조사를 통한 호남권 지역의 산사태 강우조건, 지형 및 지질특성, 임상특성 등을 분석하였다.
2. 2개의 호남권 대규모 산사태 지역에서 각 지역별 12개의 토질실험 결과로부터 통계방법으로 토질특성 등을 분석하여 전단강도를 간편하게 구할 수 있는 산정모델식을 제안하였다.
3. 산정모델식의 검증을 위해 인근지역에서 채취한 토질실험 결과를 토대로 전단강도를 산정모델식의 결과와 비교·분석하였다.
4. 산사태 발생 시나리오별 강우강도 조건(실제 강우조건, 10mm/hr, 30mm/hr, 50mm/hr)을 고려하고 개발된 산정모델식을 통한 전단강도를 사용하여 침투해석 및 사면안정해석 결과를 분석하여 전단강도 산정모델식의 검증을 수행하였다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 우리나라 산사태의 특성

산사태는 눈이나 강우에 의해 지표수가 토층으로 침투되어 연약화된 흙이나 암편 등이 사면을 따라 미끄러져 흘러내리는 현상(Dictionary of Geological Terms, 1976), 흙과 암석 등의 토석류가 암과 토층의 사면 경사면을 따라 흘러내리는 현상(Crudon, 1991) 등으로 정의하고 있다.

이러한 산사태는 지진, 강한 호우, 폭풍, 급격한 침식, 수위변화 등과 같은 다양한 외력에 의해 발생하며(Dai 등, 2002), 흙이나 암석 또는 암편 등 지표상에 있는 여러 물질의 집합체가 사면을 따라 이동하는 현상(Varnes, 1978)으로 볼 수 있다. 산사태는 토층물질이 파괴되어 사면을 구성하고 있는 물질이 사면의 하부로 이동되는 현상을 의미한다.

우리나라의 2011~2020년까지 산사태 발생 추이를 살펴보면 산사태 면적은 연 평균 340ha, 인명피해는 평균 6.1명, 복구비는 평균 736억원으로 나타났다. 2016년 이후 산사태 피해가 점진적으로 증가하고 있는 추세이며, 이 중 대규모 산사태로 분류되는 2011년 우면산 산사태, 2020년 곡성 산사태 등이 있다(산림청, 2021). 따라서 산사태 위험지도 구축 및 산사태 예측정보 제공 시간을 확대하고 있으며, 산사태 발생 우려지역 조사 예산 확보로 5년 내 모집단 조사가 완료되어 집중호우 및 태풍 등 기상변화에 따른 산사태 피해를 예방하고 산사태 대응을 위한 대책을 수립하고 있다.

산사태는 전술한 바와 같이 여러 학자들에 의해 정의되고 분류되고 있는데, 그림 2.1은 주요 산사태의 형태에 대해서 그 특징을 일반인들도 쉽게 알 수 있도록 미국 지질조사소에서 작성한 모식도이다(Highland and Johnson, 2004). 산사태 유형 중 그림 2.1(a) 활동은 회전형과 전이형으로 구분되는데 회전형 활동은 파괴가 일어난 산사태의 표면이 위로 오목한 형태를 보이면서 산사태 물질은 곡면을 따라 이동하는 반면, 그림 2.1(b) 전이형 활동은 비교적 평평한 파괴면을 따라 산사태 물질이 아래로 곧게 이동하는 형태이다. 그림 2.1(c)의 블록 활동은 단일 블록 또는 응집력을 가지는 몇몇의 블록이 전이형 활동으로 붕괴되는 형태이다. 그림 2.1(d)의 낙석

은 급경사의 사면이나 절벽에서 암석이 파괴되어 하부로 떨어지는 형태이며, 그림 2.1(e)의 전도는 단열에 의해 분리된 암석이 중력의 작용에 의해 전방으로 회전하면서 붕괴되는 형태이다.

유동은 5가지의 형태로 나뉘는데, 먼저 토석류는 토층, 암편, 유기물질, 공기 및 물 등이 섞여 끈죽의 상태로 사면하부로 흘러가는 현상이며, 그림 2.1(f)와 같이 산사태 물질 내에 자갈보다 작은 입자로 구성된 세립물질의 함유량이 전체의 50% 미만이면서 집중호우나 눈의 녹음으로 인해 표층에 급격한 물의 흐름이 생길 때 발생한다.

그림 2.1(g)는 토석류의 아주 급격한 흐름을 의미하며, 토류는 그 형태가 모래시계 모양인 것이 특징으로 사면물질의 액상화가 진행되면서 사면의 상단부가 함몰되면서 발생한다. 그리고 주로 세립물질이나 점토를 함유하는 암석으로 구성된 사면이 물에 의해 포화된 상태에서 발생한다. 토류는 그림 2.1(h)와 같이 토류형태이면서 사면물질이 충분히 유동할 수 있을 만큼의 수분을 함유했을 때 발생하며, 산사태 물질에는 모래, 실트 및 점토 크기의 입자들이 적어도 50% 이상 포함되어 있는 경우이다.

그림 2.1(i)의 포행은 사면물질이 사면하부로 아주 서서히 이동하는 현상을 일컫는다. 마지막으로 그림 2.1(j)의 측면퍼짐은 점착력이 있는 흙이나 암체가 그 하부에 위치한 부드러운 물질로 가라앉기도 하며 이동해 나가는 것이다. 그리고 파괴면이 뚜렷하지 않고 하부에 놓인 부드러운 물질의 액상화나 유동에 의해 일어날 수 있으며, 산사태 물질은 침하, 수평이동, 회전이동, 부서짐, 혹은 액화되어 흐를 수 있다.

산사태는 외적, 내적 요인으로 구분할 수 있으며 두 요인이 복합적으로 작용되었을 때 사태가 발생하게 된다. 즉, 지형조건 및 토질특성 등은 산사태 발생의 내적 요인이며, 집중호우 및 태풍 등 기상변화는 산사태 발생의 외적 요인에 해당한다(홍원표와 송영석, 2002). 우리나라는 6~9월 계절성 집중호우로 인해 대부분의 산사태가 발생하며, 토층의 성질이 다른 곳에서 많은 산사태가 발생하였다(최경, 1986).

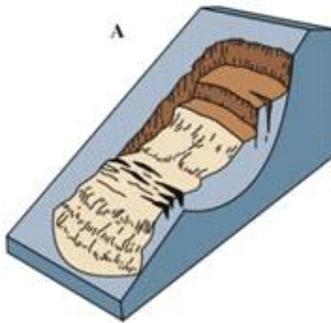
집중호우 및 태풍 등에 의한 강우로 비가 내리는 동안 증가된 간극수압은 산사태의 가장 중요한 원인이 되는 것으로 알려져 있으며, 증가된 간극수압은 지층의 전단강도 감소, 유효응력 등을 감소시킴으로 산사태를 유발하는 것으로 알려져 있다.

우리나라의 경우 자연사면에 발생하는 산사태는 능선 부근의 전이형 슬라이드를 나타내는 토석류로 이들은 대부분 여름철에 내리는 집중호우에 의하여 발생하였다. 그리고 산사태는 여러 유형 중에서 토석류로 물질의 유동이나 슬라이드로 사면 상

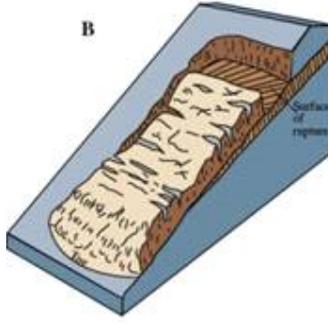
부에서 발생하여 계곡을 따라 흘러내리는 유동성 형태의 산사태를 보였다.

이와 같이 산사태는 자연사면의 토층에 분포된 붕적토, 잔류토 및 풍화토, 풍화암 등에서 발생한다. 산사태는 일반적으로 호형이나 원형 및 평면파괴 형태로 붕괴되어 흐르는 전이형 산사태가 대부분이며, 산사태 물질이 사면하부로 이동하여 계곡을 따라 흘러내리는 유동성 산사태의 양상으로 변화된다. 산사태 중 규모가 크지 않은 산사태는 대부분 토석류를 수반하지 않는 산사태이며, 규모가 큰 산사태의 경우는 대부분 토석류를 수반하는 유동성이나 전이형 산사태들이다(김경수, 2005).

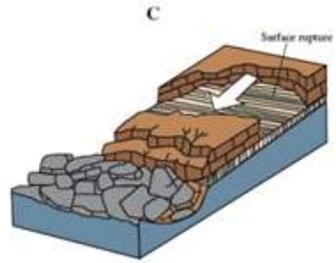
김원영 등(1998)은 1996년부터 1998년까지 3년간 경기도 일대를 대상으로 연구하여 이와 같은 산사태는 2일간 적어도 200mm 이상의 집중호우가 있을 때 발생하는 것으로 보고하였다. 이는 기반암의 상부를 피복하고 있는 풍화잔류토나 기타 퇴적물들이 200mm 이상의 집중호우에 의해 포화상태에 이르고, 하중증가와 함께 중력이 작용하여 사면하부로 쉽게 미끄러질 수 있음을 지시하는 결과이다.



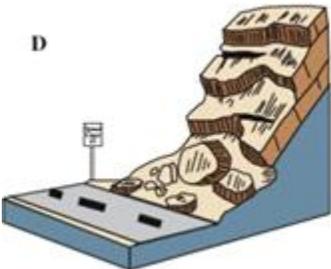
(a) 회전형 활동



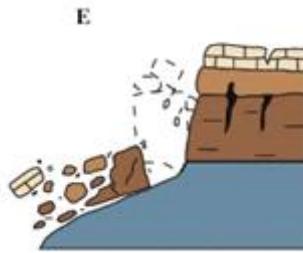
(b) 전이형 활동



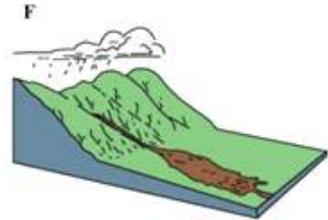
(c) 블록활동



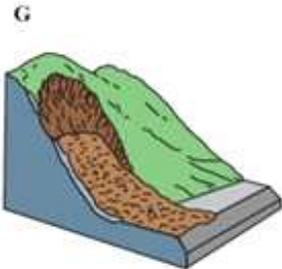
(d) 낙석



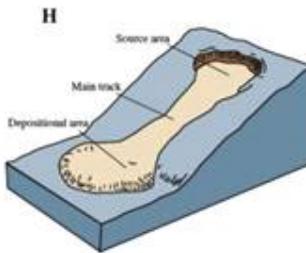
(e) 전도



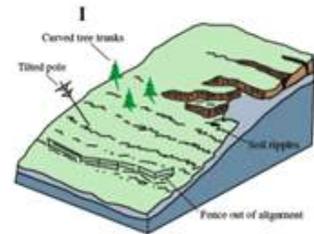
(f) 토석류



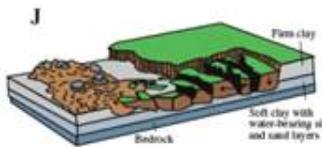
(g) 퇴적 토석류



(h) 이석류



**Creep**  
(i) 포행



(j) 측면파짐

그림 2.1 형태에 따른 산사태의 분류(Highland and Johnson, 2004)

## 2.2 산사태 발생 메커니즘

사면파괴란 외력이나 중력에 의해 경사진 자연사면이나 인공사면의 상부사면에서 흙이나 암석 등이 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하는 것으로, 이때 이동하려는 전단응력이 흙의 전단강도 보다 크게 되면 사면파괴가 발생하게 된다.

사면의 파괴 형태는 유동, 활동, 붕락으로 구분되며, 우리나라의 경우 주로 여름철 집중호우 및 누적 강우에 의한 파괴 형태가 많은데 그 원인을 전단강도 감소에 의한 내적원인, 전단응력을 증가시키는 외적원인으로 구분할 수 있다.

### 1) 내적요인

지질조건으로는 암석의 종류, 풍화도, 주향과 경사, 절리면의 충전상태, 지하수 배치상태, 토양발달상태, 토심, 토양 단면상의 불연속성 등 많은 인자들이 고려 대상이 된다.

지형조건은 한 지점과 넓은 지역을 대상으로 할 때 고려하는 조건이 다르다. 대상 지역이 한 지점을 대상으로 할 경우에는 사면길이, 경사, 경사 변화대, 방위, 종, 횡단면상 등이 고려되어야 하며, 넓은 지역을 대상으로 할 경우에는 사면의 경사, 계곡간 표고차, 지반고, 계곡의 깊이 등이 주 고려사항이 된다. 또한, 배수조건과 지형이 산사태 발생에 중요한 요인이 될 수 있으므로 수로 밀도, 하천경사, 간극수압, 수계 등을 고려해야 한다.

임상(식생)은 산사태를 억제하는 효과와 동시에 촉진하는 효과를 갖는 이중성을 보인다. 억제효과로는 나뭇잎의 차양막 효과, 수분 흡수 증발에 의한 유효 강우 감소 효과, 근계의 보강효과, 근계의 수분흡수에 의한 지반 함수비 감소효과, 근계에 의한 조립자 탈착효과 등이 있다. 촉진효과로는 태풍과 강우 시 지하수위의 상승, 암반사면에서 뿌리의 썩기작용, 강풍에 의해 지반을 교란시켜 침투로를 형성하고 전단강도를 감소시키며, 임상(식생)의 무게에 의한 상재압의 증가로 활동력 및 저항력 증가효과를 함께 가지고 있다. 강풍이 불어 큰 수평하중이 수목에 전달되면 활동력을 증가시켜 산사태를 촉진하는 요인으로 작용하게 된다.

### 2) 외적 요인

산사태를 발생시키는 요인 중에 가장 크게 작용하는 것은 강우이다. 강우로 인해

간극수압의 상승으로 인한 전단강도 감소, 표면우수에 의한 표면침식, 흙의 포화로 인한 단위중량 증가 등의 원인으로 붕괴하려는 힘의 증가와 저항력의 감소가 동시에 발생한다. 강우에 의한 사면붕괴는 장마, 태풍, 집중호우 시 일어나는데 특히 선행강우량, 강우강도, 최대강우량의 개념이 중요하다.

하천, 해안의 침식은 사면하부의 세굴작용을 일으켜 표토층 붕괴가 일어나 대규모 붕괴로도 발전한다. 최근에 수로의 변경, 임도개설, 광산개발, 주택지, 산업지 조성을 위한 평탄화 작업, 도로, 절·성토 등에 의해 자연사면이 변형되어 사면을 불안정하게 한다. 이로써 전단저항의 감소와 전단력의 증가로 활동력이 증가하여 산사태가 발생한다. 특히, 절토사면의 경우 암석이 장시간에 걸쳐 기후변화와 공기에 노출되어 아무리 단단한 암석이라고 하더라도 암석의 풍화가 일어나 산사태가 발생하는데, 도로, 철도주변의 지역의 산사태 발생 위험성이 높다.

산사태는 내적요인과 외적요인이 함께 작용할 때 산사태가 발생한다. 즉, 내적으로 취약한 지질구조를 가진 사면에 외적요인인 강우나 절성토 요인이 추가적으로 일어나게 되면 산사태의 발생 가능성이 높아진다.

## 2.3 강우

### (1) 국내 강우 특징

우리나라는 6-9월 여름철 우기시에 집중호우 및 태풍에 의한 산사태가 지속적으로 발생하고 있다. 최근 기상 이상현상으로 인한 집중호우, 태풍, 국지성 폭우 등으로 산사태 피해가 지속적으로 발생하고 있는데 해마다 그 피해규모와 피해면적은 증가하고 있는 추세이다.

집중호우의 경우 빈도수는 1980년대 이전보다 1990년대 들어서 크게 증가하였으며, 기상 이상현상으로 집중호우, 국지성 폭우, 태풍 등에 의한 피해가 대부분을 차지하는데 이러한 집중호우 발생은 사면붕괴와 같은 산사태 등으로 직결된다. 1999년부터 2017년까지 약 20년간 산사태에 피해현황을 살펴보면, 2002년 태풍 루사, 2003년 태풍 매미, 2012년 태풍 산바로 인해 큰 인명피해 및 재산피해가 발생하였다. 이러한 자연재해로 사면붕괴로 인한 평균 복구비용은 880억원, 피해면적은 500ha가 발생한 것으로 나타났다.

2002년 8월 태풍 루사는 강원도 지역에 약 870mm의 일최대강우량으로 종전 최대치였던 약 305mm 보다 3배에 가까운 강우량으로 82년 만에 일최대강우량을 갱신하였다. 그림 2.2와 같이 태풍 루사는 기록적인 폭우의 영향으로 산사태가 발생하였으며, 그 복구비용은 약 3천억원, 면적은 약 2,800ha로 상당한 물적·인적 피해가 발생하였다. 또한 2011년 7월 중부지방에 집중호우로 우면산 산사태 피해가 발생하였다. 이로 인해 부상자 및 사망자가 각각 50명, 18명이 발생하였으며, 약 1,600억원의 복구 비용이 발생하였다. 그리고 경남, 강원, 충청, 경기도 지역에 집중호우로 인해 산사태 피해가 발생하였다.

우리나라의 강우특성은 매년 강우량은 감소하지만, 집중호우 등의 빈도는 증가하고 있으며, 우리나라 면적의 70%가 산지로 지리적 특성상 집중호우시 산사태와 같은 피해가 많이 발생하고 있다.

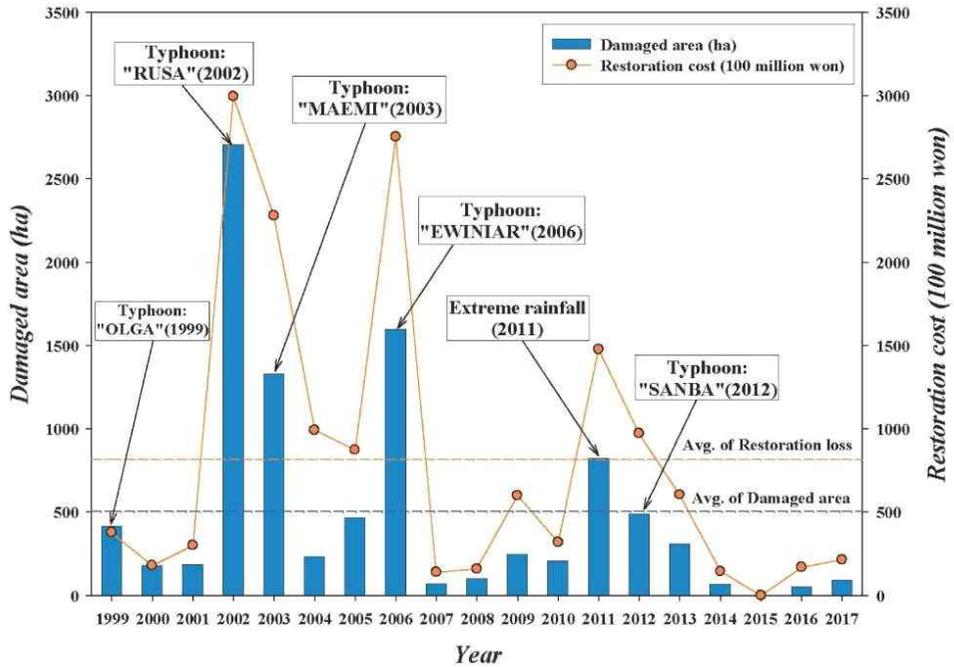


그림 2.2 사면붕괴에 따른 복구비용 및 피해면적(곽락호, 2019)

(2) 사면붕괴와 강우강도의 관계

우리나라의 지리적인 특성상 강우량은 산사태 발생과 상당한 관계가 있으며, 누적 강우량이 직접적인 영향인 것으로 보고 있다. 특히, 국내 강우를 크기에 따라 나누어 산사태의 빈도를 구분하기도 한다.

김석우 등(2012)은 산사태 발생시, 그림 2.3과 같이 연속강우와 강우강도의 누적 강우량의 관계에 있어 강우 지표에 따라 산사태 주의보 발령기준을 비교해 본 결과, 2개소 이외의 대부분 산사태는 산사태 주의보 발령기준(강우강도 20mm/hr 이상, 연속강우량 100mm 이상)을 상회하는 수준의 상황에서 발생한 것으로 나타났다. 이 중 전체의 약 85%의 산사태는 산사태 경보발령 기준을 상회하는 상황에서 발생했지만, 약 15%의 산사태는 산사태 경보발령 기준에 미치지 못하는 상황에서도 발생한 것으로 조사되어 누적강우량과 강우강도는 산사태와 같은 사면붕괴에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

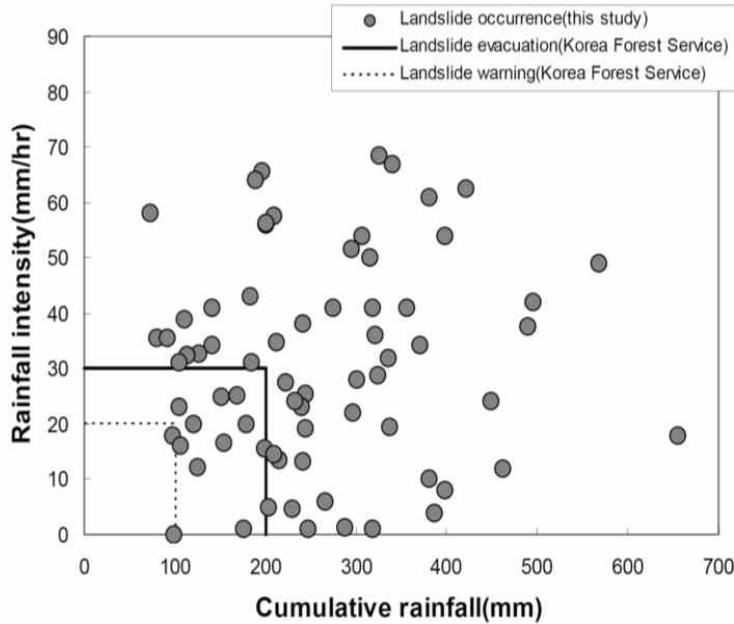


그림 2.3 사면붕괴와 강우강도(연속강우)와의 상관성(김석우 등, 2012)

남동호 등(2018)은 강원도 지역의 경우 비교적 짧은 지속시간 동안의 집중호우가 내렸음에도 대피등급으로 산정되었으며, 그림 2.4와 같이 토석류 발생 직전 3시간 전의 경우 10% 이하, 6시간 전과 12시간 전 또한 동일하게 10% 이하로 관심등급으로 산정되었다. 짧은 시간 동안에 강도 높은 강우로 인해 산사태가 발생한 것으로 판단된다.

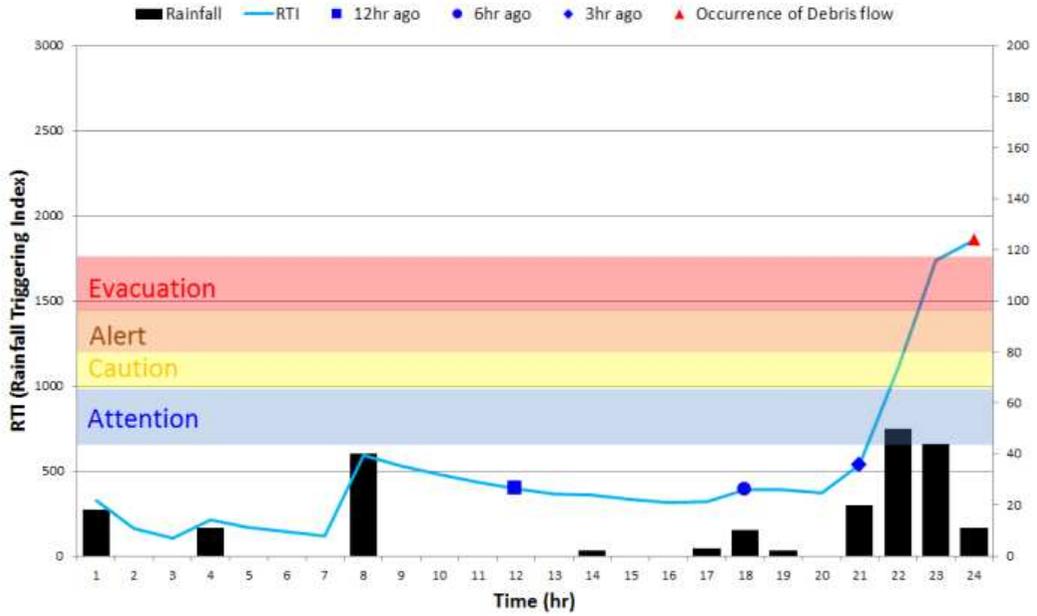


그림 2.4 강원도 지역의 강우강도와 토석류 상관성(남동호 등, 2018)

## 2.4 불포화토의 기본이론

### 2.4.1 불포화 토질역학

#### (1) 불포화 토질역학

지반내의 간극은 물로 포화될 수도 있고, 공기와 물이 공존하고 있을 수도 있다. 따라서 토질역학은 광범위한 지반의 특성을 포함 할 수 있어야 한다. 그러나 토질역학에서는 포화 모래, 실트, 점토 및 건조한 모래 등의 특수한 상태의 흙에 대하여 연구하였다. 현실적으로 고전적인 토질역학인 포화토질역학으로 실제지반의 거동을 해석할 수 없는 문제들이 발생하고 있으나, 대부분의 지반공학이나 지중구조물 설계에 포화토질역학을 이용하는 것은 해석상의 편의성과 안전성 때문이다. 일반적으로 토질역학은 그림 2.5와 같이 포화토질역학(Saturated soil mechanics)과 불포화토질역학(Unsaturated soil mechanics)으로 구분할 수 있다.

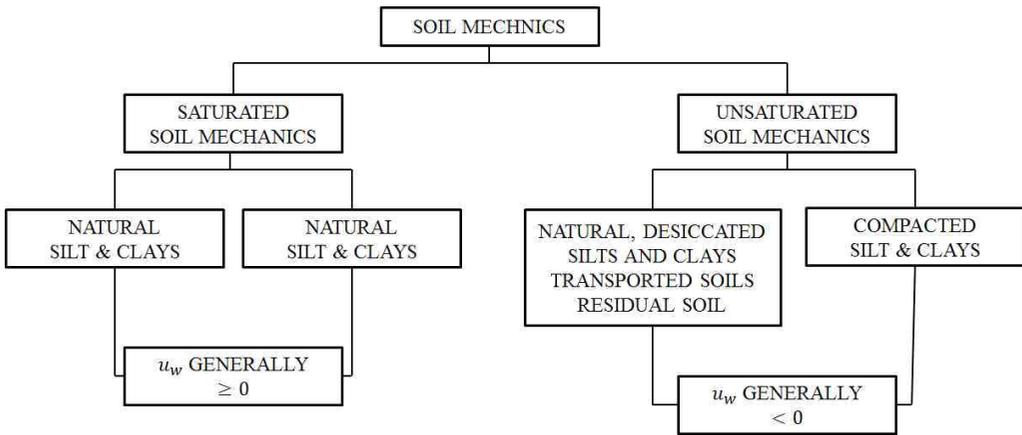


그림 2.5 토질역학의 분류(Fredlund, 2002)

지구표면의 약 33% 정도는 건조, 반건조 지역으로 분류되며 이러한 지역은 지하수위가 깊이 위치하여 지표 부근의 지반은 불포화상태를 이룬다(Fredlund and Xing, 1995). 포화토질역학에서는 대체로 지표의 침투현상을 무시하고 있으나, 지표에서의 침투는 지반공학에서 중요한 역할을 한다. 만약 그림 2.6과 같이 지표가 불투수층으로 덮여 있다면 간극수압은 정수압 조건을 갖는다(Fredlund, 2002).

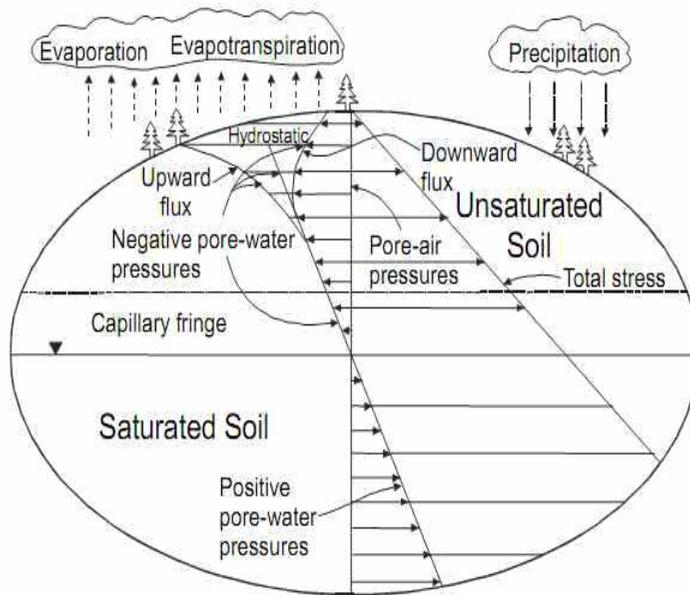


그림 2.6 지표침투에 대한 경계조건(Fredlund, 2002)

지표면에서의 강우와 침투는 간극수압을 증가시키고 반대로 증발과 증산은 간극수압의 감소를 야기한다. 결과적으로 지중구조물의 위험을 야기하는 것은 모관흡수력의 변화이다.

장기적인 기후의 변화는 지하수위의 위치에 변화를 미친다. 증발 및 증산은 지반의 지하수위를 하강시키며, 강우는 지하수위를 상승시킨다. 지하수위가 하강하여 지하수위 상부의 영역이 충분히 크다면 지반은 그림 2.7과 같이 3가지 영역으로 구분할 수 있다. 따라서 불포화토의 역학적 거동은 지반 내의 물과 공기의 연속성 및 불연속성을 고려하여 해석하여 하며 포화토질역학 보다 더 복잡하다.

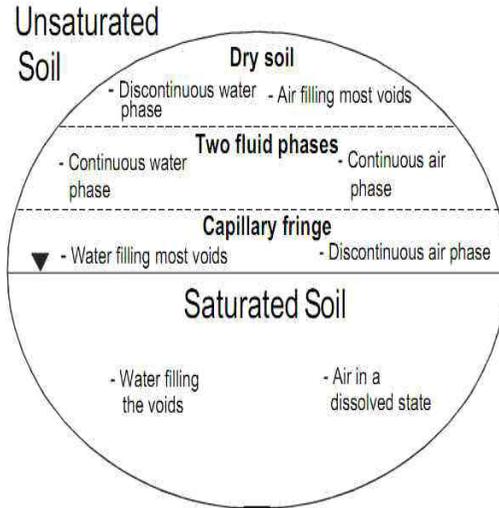


그림 2.7 유체상의 특성에 대한 지반상태(Fredlund, 2002)

포화토와 불포화토의 거동이 크게 차이가 나는 것은 그림 2.8과 그림 2.9와 같이 불포화토에서는 일반 포화토에 비해 공기 상태가 존재하므로 이로 인해 물-공기 접촉면이 존재하여 불포화토는 4상의 관계가 나타난다.

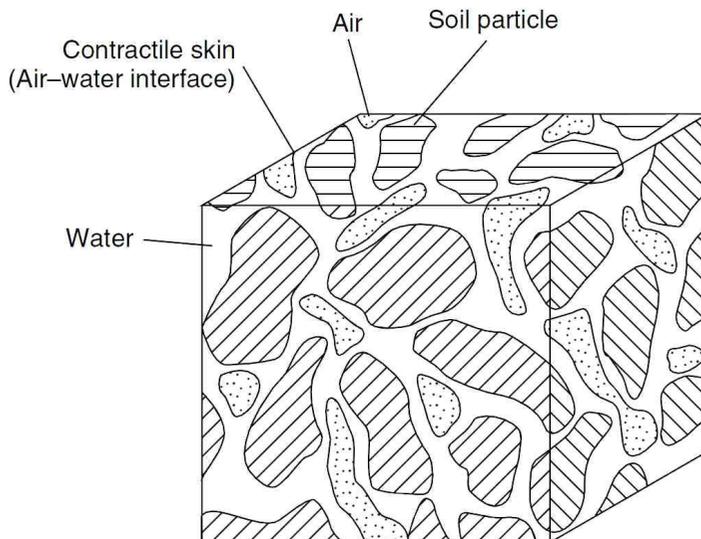


그림 2.8 불포화토의 4상 구조(Charles and Bruce, 2007)

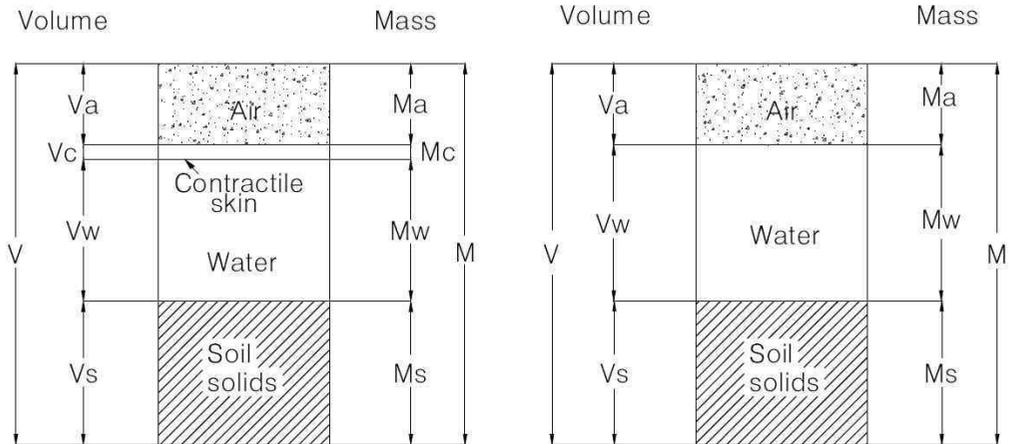


그림 2.9 불포화토의 4상 및 3상 관계(Charles and Bruce, 2007)

물-공기 접촉면에서 불포화토는 포화토와는 매우 다른 거동을 보이므로 지반의 불포화특성을 고려하면 지반거동의 해석이 매우 복잡해진다. 포화토에서는 실내실험을 통하여 비교적 손쉽게 지반정수를 구할 수 있으나, 불포화토에서는 공기의 큰 압축성, 간극수압의 변화 및 공기압의 유지등의 문제로 인하여 지반거동의 해석을 위한 지반정수의 획득이 어렵다. 또한 불포화토의 지반정수는 고정된 값이 아닌 비선형적인 함수로 표현되므로 강우나 증발에 의하여 변화하는 불포화토 지반의 지반정수를 예측하고 분석하는 것은 매우 어려운 일이다.

따라서 불포화토의 거동을 해석하기 위한 지반정수를 예측하기 위한 연구가 계속되고 있으며, 대부분 예측을 위하여 사용하는 방법으로 포화상태의 지반정수와 함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)을 사용하고 있다. 특히, 함수특성곡선은 불포화토 지반의 공학적 특성을 가장 잘 대변해 주는 방법이므로 지반의 포화도 및 함수비에 대한 흡 속의 모관 흡수력을 나타낸 것이다.

## (2) 모관 흡수력

물은 물리적 작용으로 흙의 간극 내에 유지된다. 흙이 물을 흡수하는 이유는 간극 내 물과 공기의 접촉면에서 발생하므로 물 분자를 흡착하는 흙 입자의 표면력으로 점토 함유량이 높을수록 표면력이 강해진다.

흙이 물을 흡수하는 것을 에너지로 표현할 수 있으며, 대기압보다 낮은 압력에서 흙이 물을 빨아들이기 위하여 발휘하는 힘을 자유에너지 상태라 정의한다. 이러한

힘을 흙의 흡수력이라 한다(Edlefsen and Anderson, 1943). 자유에너지는 흙 속에 존재하는 물의 증기압에 의하여 측정되며(Richards, 1965), 간극 수증기의 부분압력과 흙의 흡수력의 열역학적 관계는 식 (2.1)과 같다.

$$\psi = -\frac{RT}{\nu_{w0}\omega_v} \ln\left(\frac{\bar{\mu}_v}{\mu_{v0}}\right) \quad (2.1)$$

여기서,  $\psi$  = 흙의 흡수력 또는 전흡수력(kPa)

$R$  = 절대기체상수(8.31432 J)

$T$  = 절대온도( $T=(273.16+t^\circ)$ )

$\nu_{w0}$  = 물의 비체적 또는 물 밀도의 역수( $1/\rho_w$ ( $m^3/kg$ ))

$\omega_v$  = 수증기의 분자질량(18.016 kg/kmol)

$\bar{\mu}_v$  = 간극수증기의 부분압력(kPa)

$\mu_{v0}$  = 순수한 물의 평평한 표면상에서 수증기의 포화압력(kPa)

흙의 전반적인 흡수력은 전흡수력이라 불리며, 이는 삼투압 흡수력과 모관 흡수력으로 구분할 수 있다. 전흡수력은 흙 내부의 물의 자유에너지에 상응하고 삼투압 흡수력과 모관 흡수력은 이러한 자유에너지의 요소들이다. 삼투압흡수력은 간극수에 용해된 염분으로 나타나며, 모관 흡수력은 물 표면에서 공기압과 수압의 차이로 나타난다. 전흡수력은 식 (2.2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\psi = (\mu_a - \mu_w) + \pi \quad (2.2)$$

여기서,  $\psi$  = 전 흡수력(kPa)

$(\mu_a - \mu_w)$  = 모관흡수력(kPa)

$\mu_a$  = 공기압(kPa)

$\mu_w$  = 수압(kPa)

$\pi$  = 삼투압흡수력(kPa)

모관 흡수력은 외부환경의 변화로 흙의 평형상태에 영향을 미친다. 염분 함량의 변화는 삼투압 흡수력의 변화와 흙의 역학적 거동에 영향을 미치지만, 일반적으로 삼투압 흡수력은 무시할 수 있을 정도로 미미하므로 지반공학적 문제에서 외부환경의 변화에 의한 전흡수력의 변화는 모관 흡수력의 변화와 같다고 할 수 있다. 그러나 염분량이 변화할 경우에는 삼투압 흡수력의 영향을 고려해야 한다.

흙에서 간극은 물이 지하수면 위로 상승하게 하는 모세관 같은 역할을 한다. 이러한 모세관 현상은 모관 흡수력과 관련이 있으며, 간극의 크기에 따라 모관 흡수력의 크기는 영향을 받는다. 간극 내 물과 흙의 접촉면에서 평형은 표면장력과 모관 흡수력이 균형을 이룸으로써 유지된다. 이때 물-공기 접촉면을 통해 물의 자중이 흙 구조에 압축력을 가하여 결국 모관 흡수력에 의해 전단강도는 증가하게 된다.

## 2.4.2 불포화토의 역학적 특성

### (1) 불포화토의 전단강도

포화토의 경우에는 간극수압이 주로 0 이상의 값을 나타내므로 유효응력에 불리한 영향을 미치게 된다. 그러나 불포화토는 간극수압이 (-)로 작용하여 유효응력을 증가시킨다. 이러한 (-)간극수압은 모관 흡수력에 의해 발생되며 대기압이 일정할 경우 모관 흡수력은 입자의 크기, 함수비에 영향을 받는다.

불포화토의 전단강도를 나타내는 파괴기준이 많은 연구자들에 의하여 제안되었다. 초기의 접근방법은 간극의 공기압을 고려하지 않았고, 불포화토를 포화토와 비슷한 방법으로 해석하였다.

포화토의 경우 지반의 전단강도는 유효응력개념과 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 이용하여 식 (2.3)과 같이 표현할 수 있다. 초기의 연구자들은 두개의 독립적인 상태변수를 이용하여 불포화토의 응력상태를 표현하고자 하였다.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - \mu_w) \tan(\phi') \quad (2.3)$$

그러나 불포화토의 경우 간극이 물로 포화되지 않았기 때문에 물과 공기가 공존하면서 간극 속의 공기압이 변화함에 따라 지반의 응력상태에 영향을 미치게 된다. 그럼에도 불구하고 간극수압과 간극의 공기압에 대한 기본적인 지식 없이 불포화토의 전단강도에 대한 많은 실험이 진행되었다.

Fredlund and Xing(1995)이 제안한 새로운 전단강도식으로  $(\sigma - \mu_a)$ ,  $(\mu_a - \mu_w)$ 를 서로 독립적인 상태변수로 사용하였다. 즉, 불포화토의 전단강도를 유효점착력 (Effective cohesion,  $c'$ ), 순 수직응력 (Net normal stress,  $(\sigma - \mu_a)$ ) 및 모관 흡수력 (Matric suction,  $(\mu_a - \mu_w)$ )의 세 가지 상태변수의 항으로 나누어 고려하여 새로운 강도정수 곱보기 마찰각,  $\phi^b$ 로 식 (2.4)와 같이 표현하였다.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - \mu_w) \tan \phi + (\mu_a - \mu_w) \tan \phi^b \quad (2.4)$$

여기서,  $c'$  = 포화토의 점착력(kPa)

$$(\mu_a - \mu_w)_f = \text{모관흡수력(kPa)}$$

$\phi$  = 순수직응력  $(\sigma_f - \mu_w)_f$ 에 대한 유효마찰각( $^\circ$ )

$\phi^b$  = 모관흡수력  $(\mu_a - \mu_w)_f$ 에 대한 겉보기 마찰각( $^\circ$ )

따라서 그림 2.10과 같이 불포화토에서는 새로운 상태인 모관 흡수력을 포함한 변형된 형태의 Mohr-Coulomb의 파괴면을 정의할 수 있다.

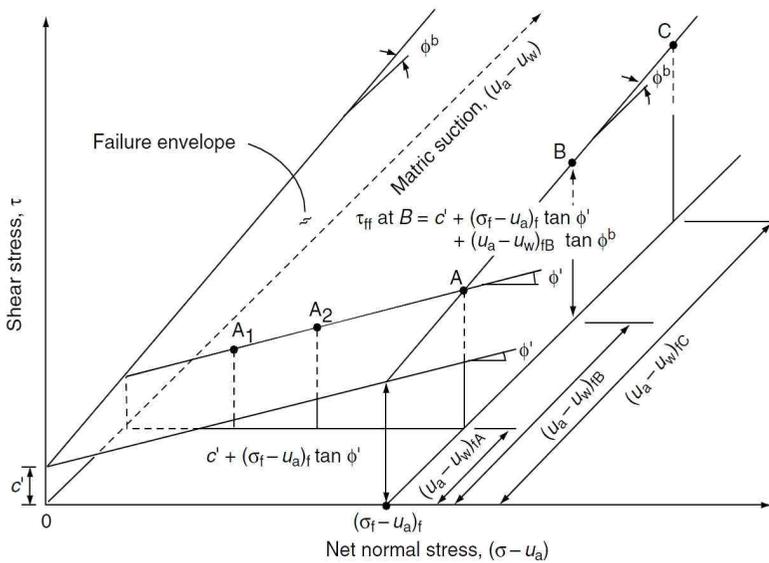


그림 2.10 불포화토에서 변형된 Mohr-Coulomb의 파괴 포락선(Fredlund and Xing, 1995)

Vanapalli 등(1996)은 함수특성곡선으로부터 시료의 잔류체적함수비를 구하여 불포화 전단강도를 나타낼 수 있는 식 (2.5)를 제시하였다. 식 (2.5)는 모관 흡수력의 증가에 따라 전단강도가 비선형적인 증가를 고려할 수 있으며, 식 (2.5)에 사용되는 포화체적함수비( $\theta_s$ )와 잔류체적함수비( $\theta_r$ ) 및 각 모관흡수력에서의 체적함수비( $\theta_w$ )는 시료의 함수특성곡선으로 얻을 수 있다. 따라서 시료의 흡-함수 특성곡선과 포화상태의 강도정수  $c'$ ,  $\phi'$ 을 알면 식 (2.5)를 이용하여 불포화토의 전단강도를 산정할 수 있다.

그림 2.11은 유효응력계수와 모관 흡수력의 관계를 표현하는 그래프로 Vanapalli 등(1996)이 제시한 식에 의해 관계도 확인할 수 있다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - \mu_a)\tan\phi' + (\mu_a - \mu_w)\left[\tan\phi' \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)\right] \quad (2.5)$$

여기서,  $\theta_w$  : 체적함수비

$\theta_s$  : 포화체적함수비

$\theta_r$  : 잔류체적함수비

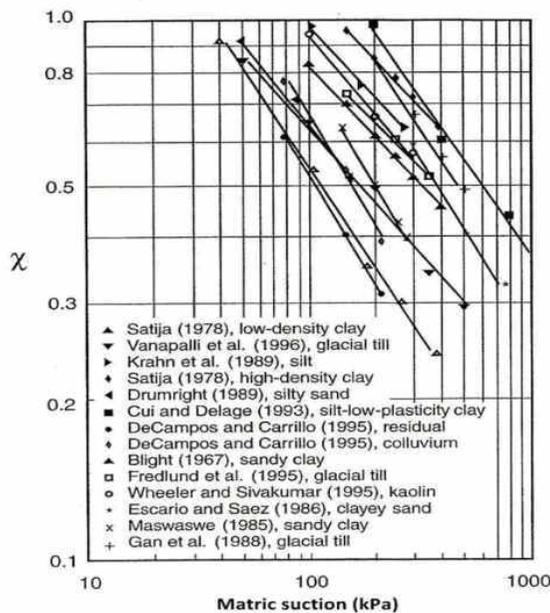


그림 2.11 유효응력계수와 모관흡수력의 관계(Fredlund and Xing, 1995)

(2) 흡수응력의 정의

Bishop and Blight(1963)는 불포화토의 유효응력을 나타내기 위해 식 (2.6)과 같이 유효응력계수인  $x$ 를 사용하였다.

$$\sigma' = (\sigma - \mu_a) + x(\mu_a - \mu_w) \quad (2.6)$$

여기서,  $\sigma'$  = 불포화토의 유효응력(kPa)

$\sigma$  = 전응력(kPa)

$\mu_a$  = 간극공기압(kPa)

$x$  = 유효응력계수

$\mu_w$  = 간극수압(kPa, 포화시=1, 완전 건조시=0)

이러한 방법은 간극수압, 간극공기압, 전응력에 의해서 변화하는 전단강도를 하나의 응력상태 변수에 의해 연관시켜 매우 한정된 상태의 불포화 시험이 요구되므로 실무에서 적용하기가 간편하다. 그러나 유효응력계수를 결정함에 있어 대부분의 연구가 불포화토와 포화토와의 관계를 규명하는데 초점이 있어 실무에서 이를 적용기 위해서는 흙의 함수특성을 통해 규명해야 하는 어려움이 있다.

최근 실험결과와 통계처리로 일정한 연관성을 수식화함으로써 간편하게 불포화토의 전단강도를 예측하는 방법이 제안되고 있다.

Bishop 응력 두 번째 항인  $x(\mu_a - \mu_w)$ 는 모관 흡수력  $\mu_a - \mu_w$ 에 관련된 흡수응력을 의미한다. Bishop 응력에 유효응력을 기술하기 위해서는 유효응력계수인  $x$ 에 대한 정의가 핵심이며, 체적함수비, 포화도의 함수, 모관 흡수력으로 나타난다(오세봉 등, 2008).

그러나 유효응력계수인  $x$ 는 모관 흡수력에 대한 유효응력 변화율이므로 실험이 어려워 모관 흡수력이 매우 큰 경우에는 흡수응력이 실제와 다르게 항상 0이 되도록 정의하고 있다. 이로 인하여 불포화토의 유효응력에 대한 연구가 어려움을 겪어왔다.

Lu and Likos(2006)는 흡수응력  $\sigma^s$ 를 정의하여 이러한 단점을 개선하였으며, 유효응력을 식 (2.7)과 같이 정의하였다.

$$\sigma' = (\sigma - \mu_d) - \sigma^s \quad (2.7)$$

Bishop의 흡수응력과 유효응력에 기반한 유효응력 형태는 유사하나 차이를 나타낸다. 유효응력계수인  $x$ 와 모관 흡수력의 조합으로 Bishop 응력을 포함하고 일반화하였다. 흡수응력은 모관 흡수력이 유효응력에 기여하는 정도를 나타낸다. Terzaghi는 간극수압 대신에 흡수응력으로 표현하여 불포화토 거동에서 유효응력의 변화를 포화토와 유사하게 분석할 수 있어서 매우 유의미하다.

흡수응력  $\sigma^s$ 는 흙 입자의 대표단면에 작용하는 응력이다. 반면 모관 흡수력은 흙 입자 사이 간극의 물과 공기의 접촉면에 작용한다. 따라서 모관 흡수력은 흙의 유효응력을 정의하는 변수가 될 수 없다. 또한, 흡수응력은 모관 상승력과 표면장력의 조합으로 나타났다(Lu and Likos, 2006).

### 2.4.3 불포화토의 수리학적 특성

#### (1) 함수특성곡선

함수특성곡선은 함수량에 따른 모관 흡수력의 변화를 정의하는 곡선으로 불포화 지반의 고유한 특징을 나타내며 지반의 전단강도와 거동특성을 결정하는데 매우 중요한 물성인자이다. 함수비는 흙 속의 간극이 포함된 물의 양으로 정의되고 있으며, 흙의 체적과 간극수 체적의 비로 표현한다. 흙과 간극수의 무게의 비로 나타내는 중력함수비로 표현할 수 있으며, 포화도는 흙속에 포함된 간극수의 양을 나타낸다.

지반공학에서는 대부분 중력함수비를 사용하나, 불포화토의 경우에는 전체 간극 중 물이 흐를 수 있는 공간을 표현하는 체적함수비를 사용한다. 이는 흙 입자, 공기, 물 3가지를 동시에 고려해야 하는 불포화토에서는 포화토 해석에 사용되는 중량함수비로 단순하게 특성을 표현할 수 없으며, 체적함수비 개념으로 간극 공기압 까지 고려해야 한다(최재형, 2008).

전형적인 함수특성곡선의 모양은 그림 2.12와 같이 S자 형태를 보이며, 그림 2.12에서 포화영역은 초기 공기 함입치를 초과할 때까지는 물이 흙 속의 간극 밖으로 유출되지 않는다. 이러한 공기 함입치는 간극 내부로 공기가 유입되기 시작하는 압력으로 정의된다.

전이영역은 흙 속의 간극으로 공기가 유입되면서 물이 유출되어 지반의 모관 흡수력은 증가한다. 여기서 지반의 고유한 특징인 곡선의 경사가 결정되며, 함수특성 곡선의 가장 중요한 요소가 된다.

잔류영역은 흙 속으로 공기의 유입이 계속되면 모관 흡수력이 지속적으로 증가하나, 모관흡수력의 증가에도 더 이상 물이 유출되지 않는 함수비가 존재하게 된다. 이때의 함수비를 잔류함수비라 한다. 이 함수비에서는 남아있는 물은 열에 의해서만 제거될 수 있다.

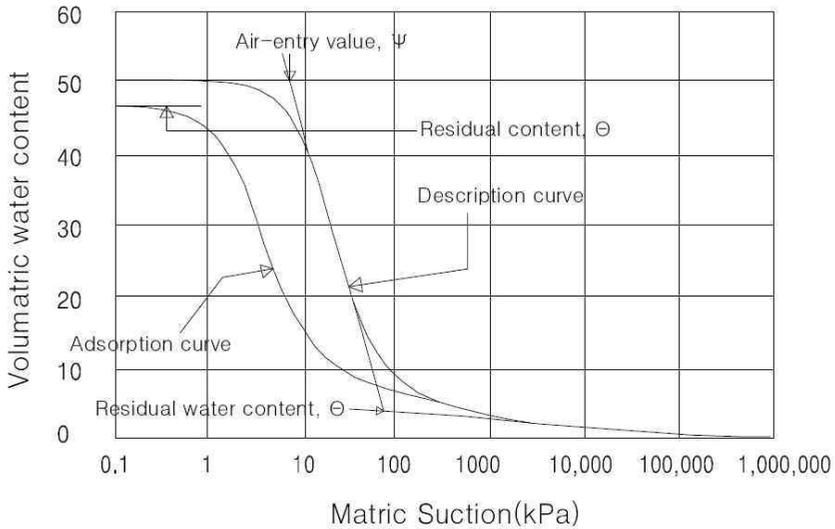


그림 2.12 실트질 토사의 함수 특성 곡선(Fredlund and Xing, 1995)

지반을 구성하는 대표적인 흙으로 모래, 실트, 점토의 대략적인 함수특성곡선은 그림 2.13과 같다. 흙의 소성이 증가함에 따라 흡인력과 체적함수비는 증가한다. 즉, 점토 등 세립분의 함량이 많으면 그림 2.13과 같이 흡인력에서 곡선의 경사는 더욱 완만해지고, 수분 보유량은 더 커지게 된다.

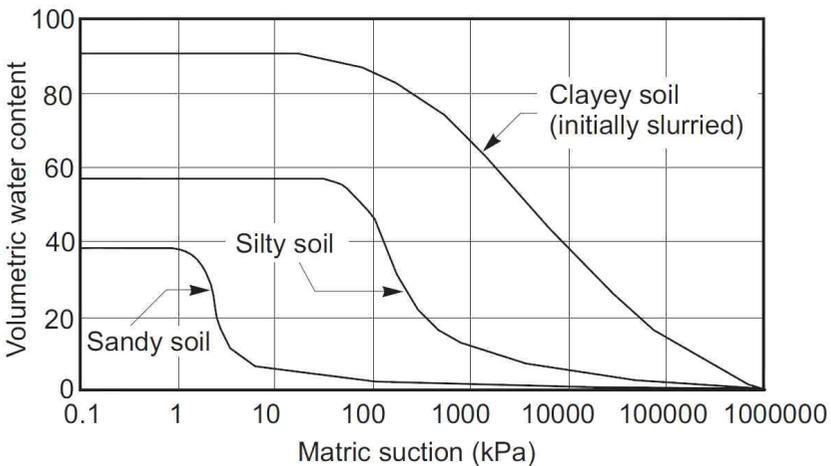


그림 2.13 흙의 종류에 따른 함수특성곡선의 유형(Fredlund and Xing, 1995)

(2) 함수특성곡선의 이론식

함수특성곡선의 대표적인 이론식은 다음과 같다.

1) van Genuchten의 이론식

van Genuchten(1980)은 모관 흡수력( $\psi$ )과 정규 체적함수비( $\theta$ )의 관계를 식 (2.8)과 같이 제안하였다.

$$\theta = \left[ \frac{1}{1 + (a\psi)^n} \right]^m \quad (2.8)$$

여기서,  $a$  = 공기함입치와 관련된 곡선 맞춤변수

$n$  = 함수특성곡선의 변곡점에서 기울기와 관련된 곡선 맞춤변수

$m$  = 높은 모관흡수력 범위에서 곡선 기울기와 관련된 곡선 맞춤변수

2) Fredlund and Xing의 이론식

Fredlund and Xing(1995)는 모관 흡수력의 최대 제한값(106 kPa)을 고려하여 전체 모관 흡수력 범위에 적용할 수 있으며, 더 정확한 결과를 주는 함수특성곡선식을 식 (2.9)와 같이 제안하였다.

$$\theta = \frac{1}{\left( \ln \left[ e + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right)^m} \quad (2.9)$$

여기서,  $e$  = 자연수

$a, n, m$  = 맞춤변수

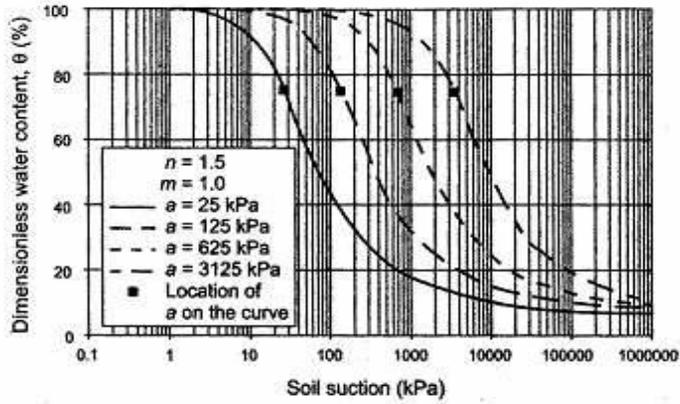
이 식을 보정계수  $C(\psi)$ 를 이용하여 체적함수비로 나타낼 수 있다. 잔류체적함수비( $\theta_r$ )를 알 수 없는 경우에는 0이라 가정하면 식 (2.10)이 된다.

$$\theta_w = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left(\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]\right)^m} \quad (2.10)$$

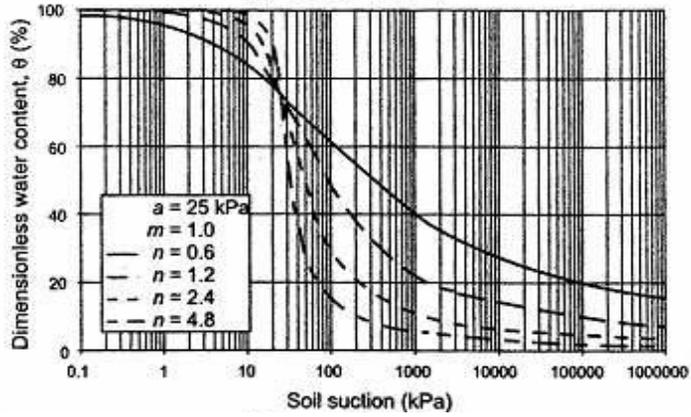
여기서,  $C(\psi) = 1 - \ln\left[1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right] / \ln\left[1 + \frac{1,000,000}{\psi_r}\right]$  ; 보정계수

$\psi_r$  = 잔류함수비에 대응하는 모관흡수력(kPa)

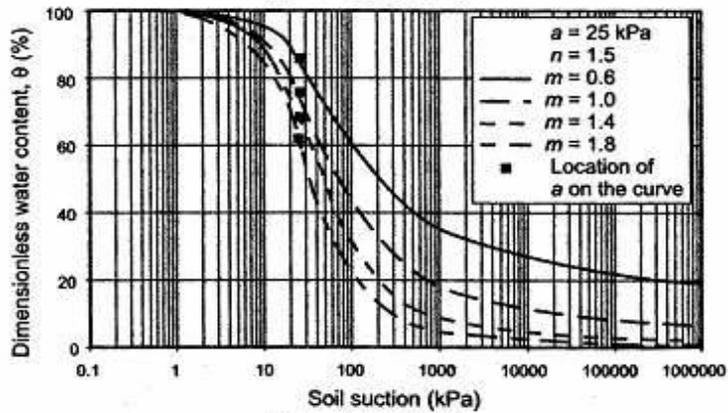
곡선 맞춤변수  $a$ 는 공기 함입치와 관련된 값이며, 일반적으로 공기 함입치보다는 큰 값을 가지고 함수특성곡선의 변곡점에서의 모관 흡수력으로 정의된다. 하지만 다른 변수  $m$ 이 작은 경우  $a$ 는 공기 함입치로 정의되기도 한다. 곡선 맞춤변수  $n$ 은 함수특성곡선의 기울기와 관련이 있으며,  $m$ 은 높은 모관 흡수력 범위에서 함수특성곡선의 변화와 관련이 있다. 그림 2.14는 식 (2.10)의 세 맞춤변수( $a$ ,  $n$ ,  $m$ )변화에 따른 곡선 형태의 변화를 보여주고 있다. 이 그림에서는 나머지 두 변수를 일정하게 유지한 채, 나머지 한 변수값을 변화시켜 곡선의 변화를 보여준다.



(a)  $a$ 값의 변화



(b)  $n$ 값의 변화



(c)  $m$ 값의 변화

그림 2.14 변수값 변화에 따른 함수특성곡선의 형태(Fredlund and Xing, 1995)

(3) 흡수응력 특성곡선

Lu 등(2010)은 흡수응력을 열역학적인 평형에 근거하여 식 (2.11)과 식 (2.12)와 같이 정의하였다.

$$\sigma^s = -(\mu_a - \mu_w)\theta_e \quad (2.11)$$

$$\theta_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.12)$$

여기서,  $\theta_s, \theta_r$  = 포화 및 잔류 체적함수비

$\theta_e$  = 유효 체적함수비

$\theta_w$  = 포화 및 잔류함수비

함수특성곡선은 임의의 흡에 대하여 유일하게 정의되며, van Genuchten 모델에 의하여 식 (2.13)과 같이 정의될 수 있다.

$$\theta_e = \left[ \frac{1}{1 + a(\mu_a - \mu_w)^n} \right]^{(1-1/n)} \quad (2.13)$$

여기서  $a$ 는 공기함입치의 역수이며, 계수  $n$ 은 간극 크기의 분포를 나타낸다. 식 (2.13)를 식 (2.11)에 대입하면 흡수응력 특성곡선은 식 (2.14)와 같이 모관 흡수력의 함수로 나타난다.

$$\sigma^s = -(\mu_a - \mu_w) \left[ \frac{1}{1 + a(\mu_a - \mu_w)^n} \right]^{(1-1/n)} \quad (2.14)$$

흡수응력 특성곡선은 함수특성곡선으로부터 구할 수 있으며, 함수특성곡선과 마찬가지로 유일하게 정의될 수 있다. 반대로 흡수응력 특성곡선으로부터 함수특성곡선을 구할 수도 있다. 식 (2.7)에서 정의된 유효응력에서 모관 흡수력이 주어지면 유효응력이 흡수응력 특성곡선에 의하여 정의될 수 있다. 따라서 함수특성곡선 및

흡수응력특 성곡선은 파괴시 뿐만 아니라 파괴 이전을 포함한 전반적인 거동에 대하여 각각 유일하게 정의할 수 있다.

흡수응력은 그림 2.15에서 나타난 것과 같이 불포화토의 파괴규준으로부터 정의할 수 있다.

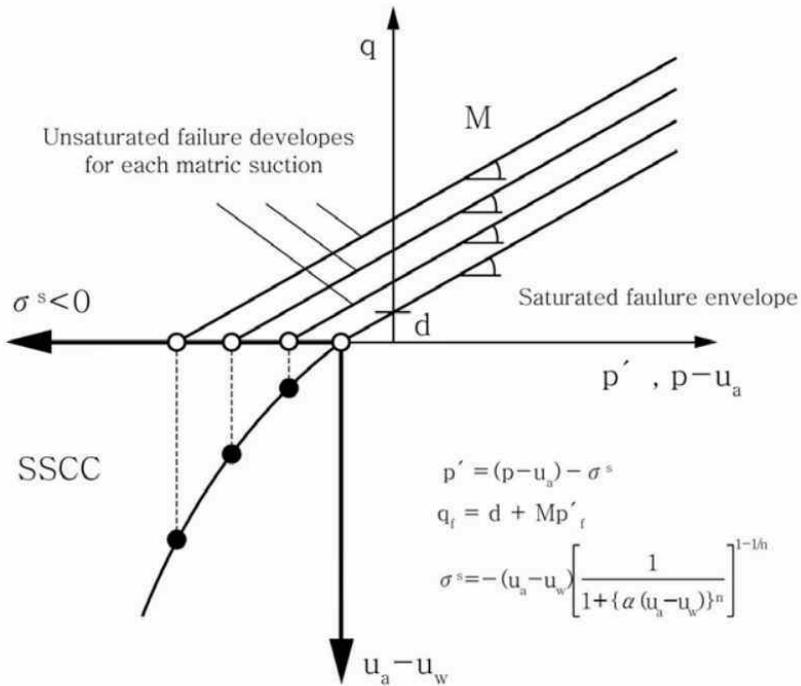


그림 2.15 p-q면에서의 Mohr-Coulomb 파괴규준으로부터의 흡수응력특성 곡선(van Genuchten, 1980)

모관 흡수력에 따른 불포화토의 파괴기준이 서로 평행한 것으로 알려져 있다. 이러한 가정하에 파괴포락선을 축차응력이 0인 상태까지 연장하면 파괴시 등방 인장응력을 구한다. 이 등방 인장응력을 포화시 등방 인장응력 값만큼 축 이동한 것이 흡수응력이다. 이러한 흡수응력은 모관 흡수력에 따른 유일한 관계로 나타나는데 이로부터 흡수응력 특성곡선을 정의한다. 전단강도나 함수특성을 실험적으로 획득하면 둘 중의 하나를 이용하여 불포화토의 함수특성곡선과 흡수응력 특성곡선 모두 구할 수 있다.

## 2.5 강우침투

강우시 지표면에 침투가 발생하면 지반 내 포화대 변화가 발생한다. 지반이 무한대로 깊은 경우는 지표면에서 포화영역이 형성되며, 중력의 영향으로 깊이가 깊어짐에 따라 함수비가 일정한 전이영역을 지난 다음 포화도가 점진적으로 감소하다가 일정한 깊이에서 일정한 포화도를 나타내며 습윤대를 형성하게 된다.

습윤영역은 그림 2.16과 같이 함수비와 모관력의 변화가 심한영역으로 지속시간과 강우강도가 밀접한 관계가 있고, 강우가 지속됨에 따라 지반내로 습윤영역이 확대되어 지반 내의 (-)의 간극수압은 급격히 감소하고 지반의 모관력이 상실되어 사면을 불안정하게 한다.

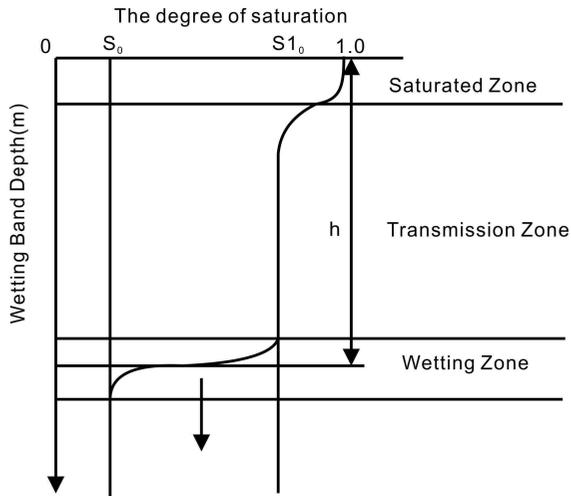


그림 2.16 강우시 습윤대의 형성

### (1) 강우시 사면의 거동 특성

산악지역의 지하수의 흐름은 불포화대를 통한 흐름과 포화대를 통한 흐름으로 구분할 수 있다. 그림 2.17은 우기시 강우는 지표면을 따라 직접 유출되거나 지표면을 통해 침투되어 불포화층으로 유입된다. 불포화층에 유입된 강우는 시간이 경과함에 따라 포화층으로 유입되어 습윤대를 증가시키고 수두 경사에 의해 지반의 높이가 낮은 곳으로 이동한다.

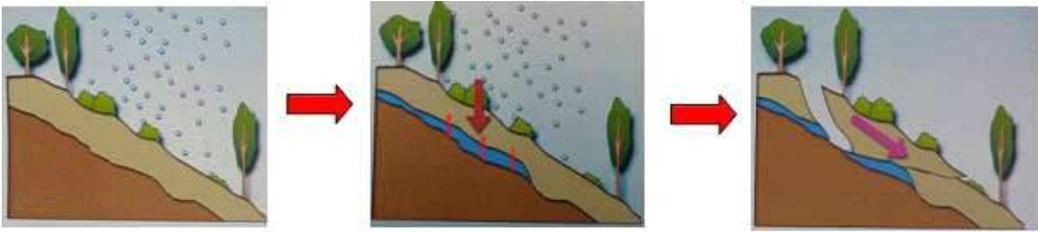


그림 2.17 강우로 인해 발생하는 사면의 붕괴 원인

많은 연구를 통해 현재 포화대를 통한 실제 지하수 흐름은 지하수의 거동과 유사한 결과를 보이거나, 불포화대의 지하수 흐름은 아직까지 지하수 특성에 따른 거동을 명확히 파악하지 못하여 불포화토의 실험식을 사용할 경우에는 주의가 요구된다. 따라서 불포화대를 통한 지하수 흐름은 중요한 영향을 미치는 요소만을 결정하여 지하수의 특성에 따른 거동을 파악하는 것이 바람직하다.

### (2) 선행강우

강우와 산사태의 관계를 분석하는데 있어서 Lumb(1975)는 강우로 인한 직접적인 침투가 사면파괴의 주요인으로 작용하고, 사면파괴 당시 일강우량 뿐만 아니라 선행강우량에 큰 영향을 받는다고 하였다. 이후 Brand(1981)는 집중호우는 지질조건에 상관없이 대규모 산사태를 일으킬 수 있으며, 강우강도가 산사태를 발생시킬 수 있는 큰 요인임을 밝혔다. 일본의 경우는 7일간 선행 누적강우량이 클 경우 적은 강우일지라도 사면이 붕괴될 수 있다고 하였다.

### (3) 강우시 지하수위

지하수위 상승은 사면안정성에 가장 큰 영향을 주는 요인으로는 볼 수 있다. 강우시 초기 간극수압은 지표면이 포화되지 않으므로 (-)의 간극수압을 나타내었으나, 강우가 지속되면 습윤대가 확대되어 지표면이 (+)의 간극수압으로 변화한다. 또한, 침투된 강우가 지하수위까지 도달되도록 강우가 유지된다면 지하수위 상승이 발생한다.

지하수위가 낮은 사면에서는 집중호우가 발생하더라도 지하수위 증가에 영향이 없으므로 침투강우에 의해 발생하는 습윤대에 대한 안정성을 평가한다. 강우에 의한 침투로 사면안정이 저하되는 원인으로는 포화도 증가로 간극수압의 증가, 지반

의 전단강도 저하, 포화도 증가에 따른 흙의 자중 증가, 우수 침투력에 따른 활동력의 증가, 지표 유출수로 표면침식 등으로 분류할 수 있다.

#### (4) 침투해석

지반내 간극수의 거동을 모델링 하는데 사용되는 유한요소 프로그램은 불포화토 및 포화토의 부정상류 상태와 정상류 상대해석, 다층지반, 흐름해석, 비등방성 투수계수, 2차원 및 축대칭문제, 투수방향 및 유량계산 등의 지반의 복잡한 침투에 대하여 적용성이 우수하다. 또한 활용범위는 지질, 토목분야, 도시계획, 수문학분야 등의 지반해석에 이용하고 있으며, 특징은 유한요소 Mesh 생성, 경계조건 적용, Mesh 절점 번호의 정렬 및 최적화, 요소의 단계적적인 추가 및 제거, Vector 형태의 흐름 방향 표시가 가능하다.

## 2.6 사면안정해석

지층은 토사층과 암반층이 복합적으로 이루어져 있으며, 사면붕괴 특성상 다소 차이가 있으므로 안정성 평가한 경우에는 이를 구분하여 해석한다. 토사 비탈면은 불연속적인 토립자들로 구성되어 하나의 연속체로 평가할 수 있지만, 비탈면 파괴 시에는 임의의 최소 활동 저항선을 따라 발생하기 때문에 토질의 지반정수에 크게 의존하게 된다. 반면 암반 비탈면의 경우, 대부분 암반 내에 절리, 층리, 엽리, 단층 등의 불연속면으로 되어 있는 암석의 집합체로 볼 수 있다. 또한, 불연속면의 거칠기, 충전물 유무, 풍화상태 등에 의해서 지반정수가 정해져 대표값을 결정하기 쉽지 않다. 토사 비탈면의 안정해석방법으로는 유한요소해석과 한계평형해석으로 구분할 수 있다.

### (1) 한계평형해석

간편법 중에는 비탈면을 절편으로 분할하여 해석하는 한계평형해석법이 많이 사용되고 있다. 한계평형해석 방법은 사면안정 및 지지력, 토압 등과 같은 지반공학적 문제를 해결하는데 사용하는 방법이다. 대상 지반을 하나의 토체로 간주하여 임의의 파괴면에 대하여 모멘트와 힘의 평형조건을 고려하는 것이다. 또한, 한계평형해석법에는 활동토체를 단일체로 보는 방법과 여러 개의 수직절편으로 분할하는 방법으로 구분할 수 있으며, Bishop(1995)의 절편법이 실무에서는 많이 적용된다.

#### 1) Bishop의 간편법

이 방법은 절편 간 작용력이 수평방향으로 작용한다고 가정하여 각 절편 저면에 작용하는 수직력( $N'$ )을 연직방향에 대한 힘의 평형조건에서 구하고, 안전율은 회전 중심에 대한 모멘트평형을 취함으로써 식 (2.15), 식 (2.16)과 같이 구할 수 있다.

$$F_s = \frac{\sum [(c'b + (W - \mu_b)\tan\phi')]\left(\frac{1}{M(a)}\right)}{\sum Wsina} \quad (2.15)$$

$$M_{(a)} = \cos a \left( 1 + \frac{\tan a \tan \phi'}{F_s} \right) \quad (\text{식 2.16})$$

각 절편에 작용하는 힘들은 그림 2.18에 나타나 있다. Bishop법으로 얻은 안전율은 정확도가 높은 것으로 평가되고 있으며, 간극수압을 고려하므로 유효응력, 전 응력 해석법 모두 적용할 수 있다.

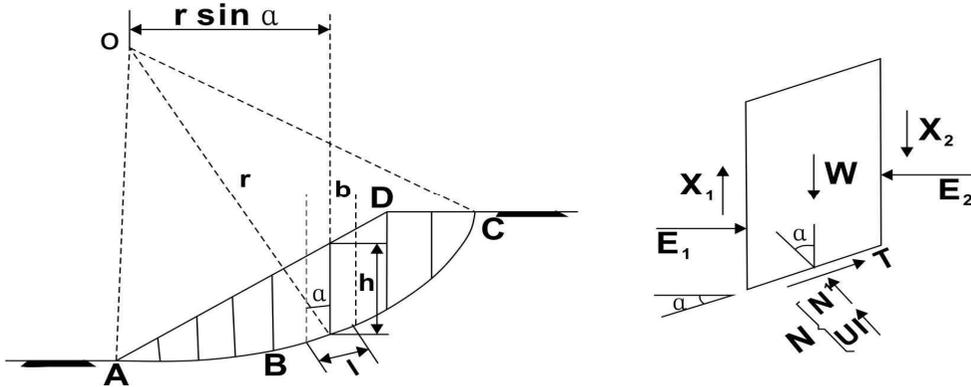


그림 2.18 한계평형 해석법에서 절편에 작용하는 힘

## 2) Fellenius 방법

Ordinary법이라고도 하며 가장 오래된 방법 중 하나이다. 안전율은 원호활동면에서 적용이 가능하고 모멘트가 평형조건에서만 구한다. 안전율은 식 (2.17)과 같다.

$$F_s = \frac{\sum c' b + \sum (W \cos a - \mu) \tan \phi'}{\sum W \sin a} \quad (2.17)$$

이 방법은 바로 안전율을 산정할 수 있으며, Bishop의 간편법에 보다 계산이 간편하나, 오차범위가 약 5~20% 정도 발생하여 과소평가하는 경향이 있다.

### 3) Janbu 방법

Janbu 방법은 Bishop 방법을 확장한 방법으로 비원호 활동면에 적용할 수 있는 안정해석법이다. 안전율은 힘의 평형조건을 이용하여 식 (2.18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = \frac{\sum c' b + N' \tan \phi'}{\sum W \lambda_{ana}} \sec a \quad (2.18)$$

#### (2) 유한요소해석

유한요소법은 탄소성 지반재료에 대한 응력해석 및 거동해석에 널리 쓰이는 해석 방법으로 지반재료의 이방성, 소성경화, 소성연화 등을 고려할 수 있으며, 비탈면 형성과정에서의 응력이력 효과도 고려할 수 있다. 또한, 비탈면 내 변형으로 인한 비탈면 형상의 변화를 미리 예측할 수 있으며, 압밀 등과 같이 지반응력이 시간에 따라 변화하는 경우와 보강된 지반구조물에 대한 해석도 가능하다. 그러나 그 결과에 대한 해석이 어렵고, 설계에서 비탈면의 안정성을 평가할 수 있는 자료가 부족하다.

## 제 3 장 연구지역의 산사태 특성

### 3.1 개요

본 연구를 위한 대상지역은 호남권 중 집중호우에 의해 산사태가 발생된 지역 중에서 지형 및 지질조건을 고려하여 2개 지역을 선정하였는데, 화강암이 분포한 A 지역과 편마암이 분포하고 있는 B지역으로 구분된다.

본 연구에서 수행된 조사 및 분석 내용은 크게 산사태가 발생된 시기의 강우특성, 산사태지역의 지형 및 지질특성, 임상특성, 토질특성 분석으로 구분할 수 있다. 우선 강우특성은 각 지역별로 산사태 발생지역을 중심으로 그 영역 내에 위치한 관측소들에서 산사태가 발생된 당시의 강우자료를 기초로 하였다. 강우자료는 기상청으로부터 수집된 것으로 각 관측소 마다 집중호우가 시작되어 종료될 때까지를 포함하여 시간강우량과 일강우량을 조사하였다. 그리고 산사태 조사는 문헌자료 및 현장조사를 통하여 현장상태를 파악하였고, 산사태 토층시료를 채취하여 실내실험을 통해 지질별 토질특성을 분석하였다.

연구지역에서의 산사태를 대상으로 현장조사를 실시하여 그 위치, 규모 및 유형 등을 파악하였으며, 발생 위치, 지질 등 산사태와 관련된 다양한 요소들을 기재하였다. 또한, 토질조사는 토층의 종류, 심도 및 조성비 등을 파악하고 대표지점으로부터 토질실험용 시료를 채취하였으며, 주로 이들 실내시험에 의한 결과를 근거로 하여 토층물질의 종류와 입자크기, 구성비, 밀도, 전단강도 등을 평가하였다.

## 3.2 연구지역의 지형 및 지질, 임상특성

산사태는 사면지역의 지질, 지형학적 및 지반공학적 특성에 따라서 그 형태, 발생 빈도, 규모 등이 다르게 나타난다. 국내의 산사태는 대부분 충적토, 잔류토, 봉적토 등의 미고결 층에서 발생한다. 즉, 토층에서 표면침식, 강우에 따른 간극수압 상승, 포화에 따른 단위중량 증가로 산사태가 발생되고 있으며, 토석류 산사태에 해당한다. 이와 같은 토석류 산사태는 소규모이지만 산사태 대부분이 모래입자 보다 큰 암편들로 구성되어 있으며, 빠른 속도로 사면하부로 이동하여 사면의 하부에 위치하고 있는 민가에 인적 및 물적 피해를 줄 수 있다(채병곤 등, 2005).

### 3.2.1 지형 및 지질특성

#### (1) A지역의 지형 및 지질특성

본 조사지역은 행정구역상 전라남도 A지역에 해당하며, 조사지역의 산계를 보면 북측에 작산-검장산-성덕산으로 부채꼴의 산계를 이루어 남측으로 발달하여 이 지역의 남동측에 백아산까지 연결된다. 또한, 그림 3.1과 같이 동측비탈면이 서측비탈면 보다 높고 가파른 경사를 이루고 있다. 동측에는 기우산 등이 독립적인 소규모 산계를 형성한다. 본 역은 비교적 급한 산악지형으로 지형 윤회 과정에서 노년기에 해당한다.

수계는 조사지역 상기의 산지에 발원한 소지류들이 동측의 성덕제에 모인 후 옥과천을 따라 북류하여 섬진강에 합류 후 광양만으로 흘러내려 간다. 또한 남측에는 동북천이 서남류하여 동북호로 흘러내려 간다.



그림 3.1 A지역 산사태 지형도

1) 재해전의 유로 및 유역도

붉은 이점쇄선이 유역면적으로 총 유역면적은 109,740m<sup>2</sup>이며 선홍색 실선의 피해 면적은 46,250m<sup>2</sup>이다. 노란 화살표는 2004년 위성지도에 등고선을 이용하여 예측한 유수의 방향이며, 기존의 수로와 등고선을 고려한 계곡부를 연결하여 파란색의 기존유로를 표시하였다. 기존유로를 기준으로 서측을 서측비탈면, 동측을 동측비탈면으로 구분하였다.

계단식 옹벽 및 도로의 보강토옹벽은 서측 비탈면에 해당한다. 계단식 옹벽은 태풍매미에 의해 발생한 수해복구사업(2004)에 의해 시공된 순천 국토관리사무소 소관의 구조물이다. 또한 최근 위성사진 확인 결과, 그림 3.2와 같이 계단식 옹벽 끝단에서 약간의 수목이 존재하나, 기존유로를 따라 밭으로 경작하여 수목이 없는 것으로 조사되었다. 그로 인해 우기시 경작지에는 우수가 표면으로 침투되고 상당량의 우수가 지속적으로 내릴 경우 상부의 토사가 하부로 유동할 가능성이 큰 것으로 보인다.

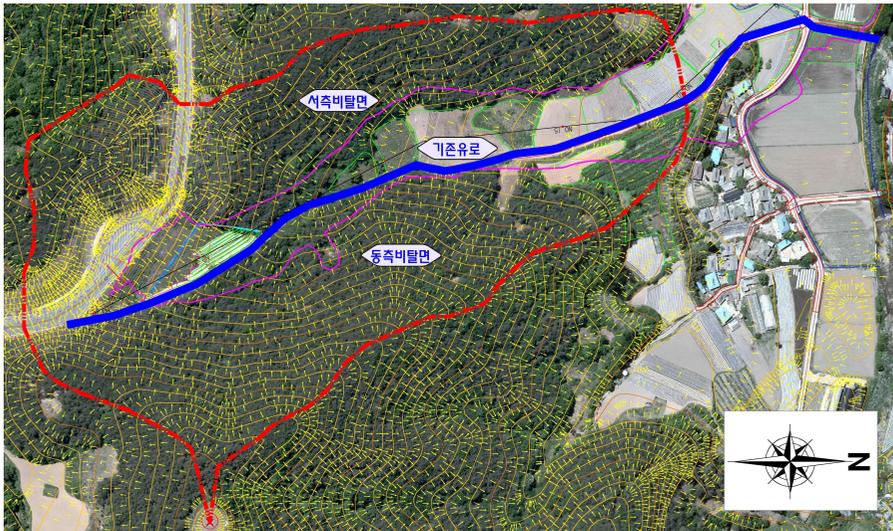


그림 3.2 재해전 유로

도로 하부의 비탈면의 경사방향(31°)과 계단식옹벽의 경사방향(58°)이 그림 3.3과 같이 사교한다. 유로가 집중되어 흐르는 방향과 계단식 옹벽구조물의 설치 방향이 일치하며, 집중되어 모이는 유수에 의해 계단식 옹벽 하부 세굴이 가능할 것으로 보인다.

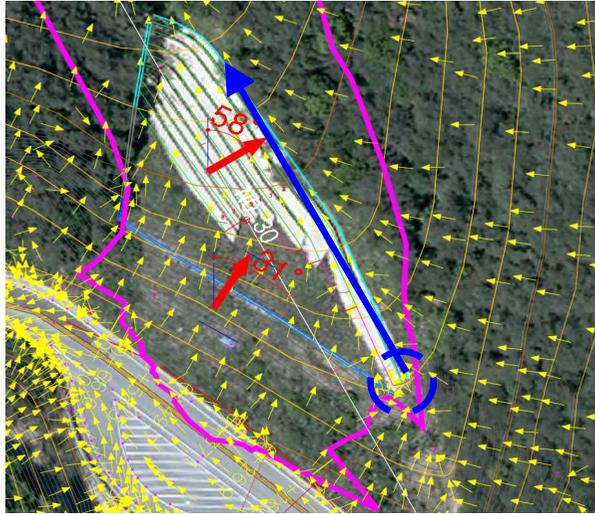


그림 3.3 도로 하부의 비탈면 방향

## 2) 종평면도

그림 3.4는 종평면도이다. 선홍색의 당초선과 흑색의 수해선의 차이를 이용하여 구간을 분류하면 No.34+10~21까지 구간은 주로 침식이 발생한 구간이며, No.0~21까지의 구간은 주로 침식된 토사 등이 퇴적되는 충전 구간으로 나눌 수 있다.

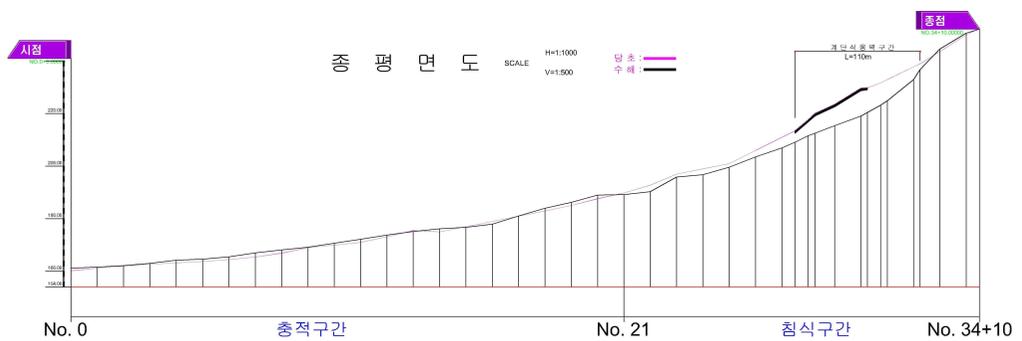


그림 3.4 종평면도

표 3.1과 같이 구간에 따른 경사각은 4.04~13.04°로 나타났으며, 파괴면으로 예상되는 계단식 옹벽구간(서측비탈면, No. 27+10~32+5)의 파괴면 노출암의 경사각이 39° 정도로 기존 유로를 향해 가파르게 경사진다.

**표 3.1 구간에 따른 경사각**

구분	거리(m)	높이차(m)	경사각(°)
침식구간 (No.21~34+10)	270	62.53	13.04
충적구간 (No.0~21)	420	29.63	4.04

### 3) 지질 특성

본 조사지역 일원의 광역지질은 그림 3.5의 A지역 지질도와 같이 주라기의 대보관입암류 화강암류가 기반암으로 분포하고 있으며 이를 제4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다. 주라기의 대보관입암류는 암상과 구조에 따라서 엽리상화강암, 반려암, 각섬암, 섬록암 및 화강암류로 구분된다.

현장조사결과, 그림 3.6과 같이 전반적으로 담적색의 조립질 화강암이 기반암을 이루며 회색 또는 연녹색의 치밀한 조직을 보이는 화산암질 암편들이 퇴적층에서 다수 관찰된다.



그림 3.5 A지역 지질도



(a) 기반암인 화강암류

(b) 퇴적층의 화산암류

그림 3.6 A지역 기반암인 화강암류

(2) B지역의 지형 및 지질 특성

1) 지형 특성

B지역은 그림 3.7과 같이 북고남저형으로 북서쪽은 산지가 발달하고 남쪽으로는 회천, 득량, 조성, 벌교가 바다와 접해있어 내륙과 해안의 특징을 모두 갖추고 있다. 군의 지형적 조건은 동북쪽에서 남서쪽으로 이어지는 백이산 ~ 존재산 ~ 방장산 ~ 백림산은 해안지방과 내륙지방을 나누고 있으며, 화순군과 장흥군의 경계를 이루고 있는 서북쪽으로는 천봉산 ~ 계당산 ~ 봉화산 ~ 벽옥산 ~ 제암산이 연결되고 있어 북부지역은 높은 산과 낮은 구릉으로 형성되어 있다. 따라서 남부의 해안지대와 보성강 유역의 분지성 평지를 제외하고는 대부분 산지를 이루고 있어 완만한 평야는 없는 것으로 보고된다.

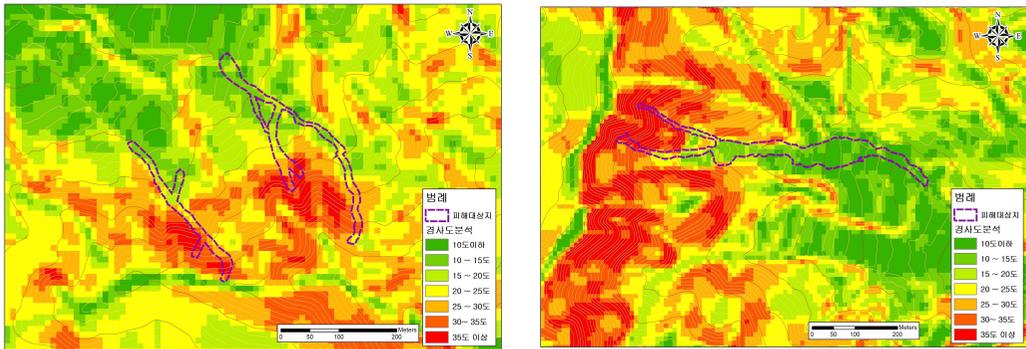


그림 3.7 B지역 산사태 지형도

피해지역의 지형특성 분석에는 경사도, 사면형(오목, 평탄, 볼록 사면으로 구분) 등을 이용한다. 지형분석 결과, 그림 3.8과 같이 붕괴 발생원 사면의 경사도는 30° 내외의 급경사지이며, 상부 집수면적이 많은 곳에 물을 쉽게 모을 수 있는 오목형의 지형을 가지고 있다. 특히, 이 지역의 상부지역은 지형구조 상 집수지형을 이루

고 있어 집중호우 시 상대적으로 지표수 및 지하수의 흐름이 집중되어 사면의 안정성이 저하된 것으로 판단된다.

즉, 기록적인 강우발생으로 인해 일시에 사면이 포화되고 지하수위가 형성됨에 따라 간극수압이 상승하고 전단강도가 저하됨에 따라 사면이 붕괴한 것으로 판단되며, 붕괴된 토석은 경사가 급한 계곡으로 유하되어 계상퇴적물과 함께 일시에 흘러내리는 토석류로 발달하여 피해가 발생한 것으로 판단된다.



(a) 봉산리 경사분포도                      (b) 정흥리 경사분포도  
 그림 3.8 산사태 주변 경사분포도

## 2) 지질 특성

B지역의 지질은 고기편마암류 그리고 변성퇴적암류와 이를 부정합으로 피복하는 퇴적층 그리고 이들을 관입한 화성암류와 소규모의 용암류 및 응회암으로 구성된다. 특히, 조사지역의 지질은 화강편마암계에 속하며, 중생대 백악기의 오봉산각력암 응회암, 도촌리 유문암, 객산리 용암 등이 국부적으로 분포하고 있다.

그림 3.9와 같이 지질도폭에 의하면 B지역 지질은 화성암류, 화산암류, 변성암류, 퇴적암류로 구성되어 있으며 이 중 변성암류가 가장 넓게 분포하고 있다. 산사태 발생지역의 경우 시대미상의 다양한 암상의 편마암과 여러 번의 관입 작용이 있었던 것으로 조사되었다.

조사지역 암반의 풍화상태는 부분적으로 신선한 상태를 나타내는 일부지점을 제외하면 전반적으로 풍화등급 완전풍화 내지 심한풍화 해당되는 것으로 관찰되었다. 풍화로 인해 벌어진 크고 작은 틈이 매우 잘 발달해 있었다.

산사태 발생 하부의 토층 단면을 관찰한 결과 미고결층이 약 2.5~3m로 비교적

두껍게 분포하기 때문에 강우에 의한 흘러내림 현상이 나타날 가능성이 크며, 향후 그 단면이 확장될 가능성도 크다고 판단된다.

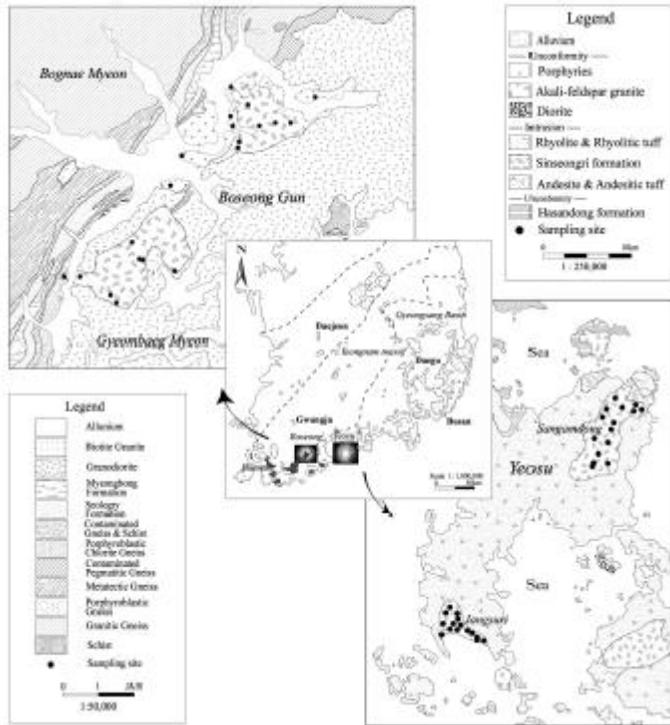


그림 3.9 B지역 지질도

### 3.2.2 임상특성

#### (1) A지역의 임상 특성

토석류 발생 좌우 주변 식생은 그림 3.10(a)와 그림 3.10(b)와 같이 소나무군락과 일부 소나무-편백군락, 굴참나무가 산재하여 분포하였으며, 소나무는 대부분 대경목으로 건강 수목은 평균 6영급, 천이로 편기 및 경쇠된 개체 포함시 4영급(3~7영급)으로 측정되었다.

식물구조는 교목층, 아교목층, 관목층, 초본층이 발달한 4층의 층위구조이며, 토성은 사양토, 유기물층은 10cm 내외, 토심은 보통 산지에 비해 깊고, 토양경도는 5mm 이하로 수목의 뿌리발달 및 강우 침투가 잘되고 지표 유출이 적은 구조이다. 우리나라 남부지방 소나무군락의 산림환경보다 양호한 식생(수령 및 크기, 식물구조, 토양환경)이며, 소형 산사태 발생지역은 과거 묘지로 추정된다. 영급이 낮은 밤나무, 뽕나무 등의 낙엽수와 편백 분포 및 낮은 토심으로 주변의 소나무군락과는 차이가 있다.

계류의 식생은 경작지 외 2개 지점에 그림 3.10(c)와 같이 2010년경부터 버드나무가 성립되어 소군락을 이루었으며, 이 지역은 배수가 잘되지 않은 토양이 과습한 지역으로 판단된다. 또한 좌측사면의 산기슭에 그림 3.10(d)와 같이 은사시나무가 소군락을 이루었으나 대부분 훼손 및 이동되어 일부 개체만 잔존하고 있다. 버드나무는 가슴둘레지름이 작고, 은사시나무는 근계의 말뚝효과 및 그물효과가 낮아 토석류 이동 제어에 효과가 낮은 수종으로 판단되며, 피해 수목은 우측의 산기슭에 분포하였던 다수의 편백과 좌측의 토석류 발생지점 부근 소나무 및 산기슭에 분포하였던 은사시나무가 주로 피해(편백 80%, 소나무와 은사시나무 등 20%)를 입은 것으로 나타났다.



(a) 식물군락(계류포함)



(b) 식물군락(소나무, 편백 등)



(c) 버드나무 분포지

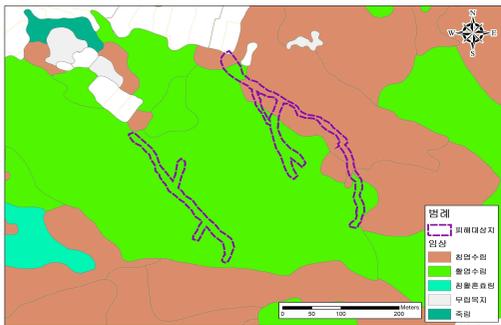


(d) 은사시나무 유목 정착지

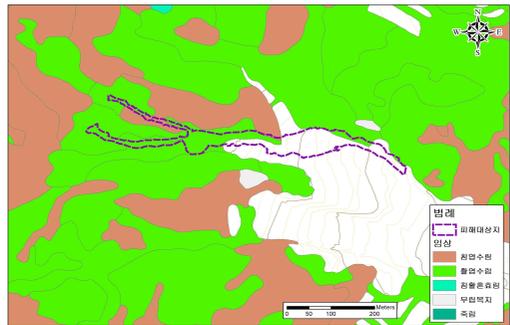
그림 3.10 A지역 임상 특성

(2) B지역의 임상 특성

산사태 피해지 연결 지역의 임상에 대한 육안조사 결과 그림 3.11과 같이 상층식생은 대부분 편백나무가 주 수종인 침엽수림으로 구성되어 있는 것으로 파악되었다. 또한 봉산리 2호지 주변의 경우 대부분 최근 벌채가 이루어져 현재 교목의 밀도가 낮은 상태로 임상 상태는 우수하지 못한 상태로 파악되나 현장확인 결과 대부분의 표층은 피복된 상태로 산사태 유발에 있어 식생 및 임상의 영향은 크지 않았던 것으로 판단된다. 특히, 이 지역과 같이 짧은 강우지속시간 내 다량의 강우가 발생한 강우 조건에서 산사태 발생에 대한 임상의 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.



(a) 임상분포 봉산리



(b) 임상분포 정흥리



(c) 산사태 발생지



(d) 임상 현황

그림 3.11 B지역 임상 특성

### 3.3 연구지역의 강우특성

우리나라는 온대성 기후에 사계절이 뚜렷하며 계절별로 그 특성이 완전히 다르다. 또한, 년평균강우량이 1,274mm로 다우지역에 속하며 온난다습한 북태평양 고기압의 영향으로 강우량이 많은 우기와 건조한 시베리아 기압의 영향을 받아 건기의 구별이 뚜렷하다.

이러한 기후특성으로 열대성저기압 및 이동성 고기압, 그리고 북태평양 고기압과 오호츠크 고기압에 의한 전선성강우의 형성이 우리나라에 영향을 미치는 강우특성이라 할 수 있다. 특히, 여름철에는 기압골의 형성에 의한 호우와 태풍으로 인해 많은 강우가 발생하는데, 이러한 집중호우의 요인으로는 대체로 강한 기압골의 형성, 남서풍에 의해 유입되는 강우전선과 난기류를 활성화시키는 지형적인 영향, 기류의 존재, 기압의 장시간 정체 등을 들 수 있다.

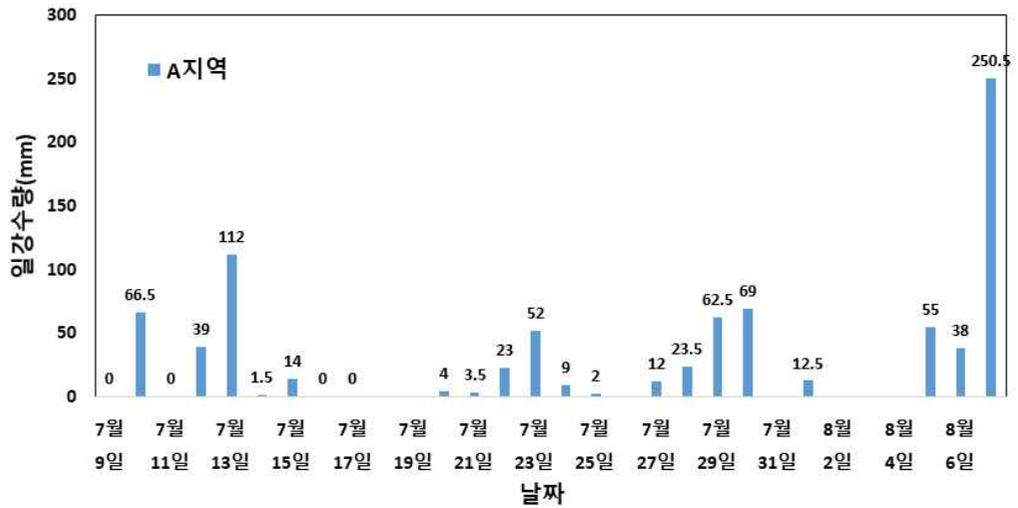
홍원표 등(1990)은 이와 같은 강우특성을 근거로 하여 우리나라를 강우특성별로 크게 3개 권역으로 구분하여 제시한 바 있다. 즉, 주로 기압골의 영향에 의한 호우 지역인 경기도와 충청도 및 전라북도 북부로 구성되는 중부지역, 태풍의 영향을 많이 받는 지역인 경상도와 전라남도 및 전라북도 남부로 구성되는 영호남지역, 그리고 상부 태백산맥의 산악지대로서 강우량이 비교적 적은 지역인 강원도 중심의 영동지역으로 구분하였다. 이에 의하면, 연구 대상지역인 A, B지역은 영호남권의 태풍이 많은 지역에 해당된다.

#### (1) A지역의 강우특성

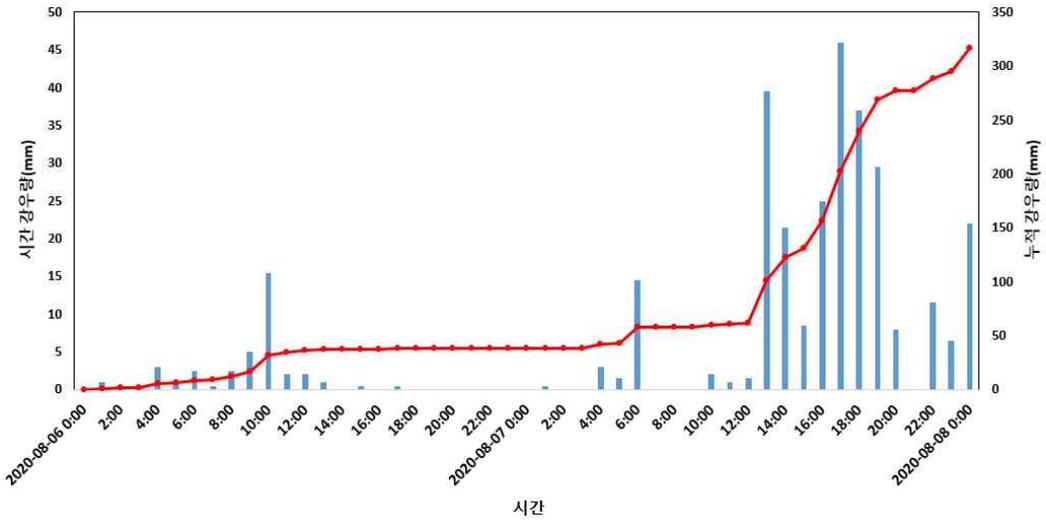
A지역 산사태 현장의 강우분석을 위해 옥과(AWS 795, 옥과면 리문리)의 우량관측소 현황을 분석하였다. 관내 기상관측소가 위치해 있으며, 강우량을 비롯한 기온, 풍속, 습도 등의 기상자료를 측정 및 제공하고 있다.

강우특성 분석 결과, 그림 3.12와 같이 산사태 피해 발생일까지 30일 동안 누적강우량은 849.5mm이며, 피해 발생 당일의 일강우량은 250.5mm이었다. 48시간 누적강우량(288mm), 피해 발생 당시 최대 시우량(46mm)로 분석되었으며, 48시간 누적강우량 288mm는 A지역의 10년 연평균강수량 1,560mm의 약 17.8%를 차지하는 강우로 조사되었다. 이러한 강우량 특성을 분석한 결과 A지역의 산사태 피해는 산사태 발생 전 발생한 선행강우로 지반이 약해져 있는 상태에서 단시간 집중호우 발생이

산사태 발생의 중요한 요인으로 파악된다.



(a) A지역의 일강수량(mm)



(b) A지역의 시간당 강수량(mm)

그림 3.12 A지역 강수량 분석

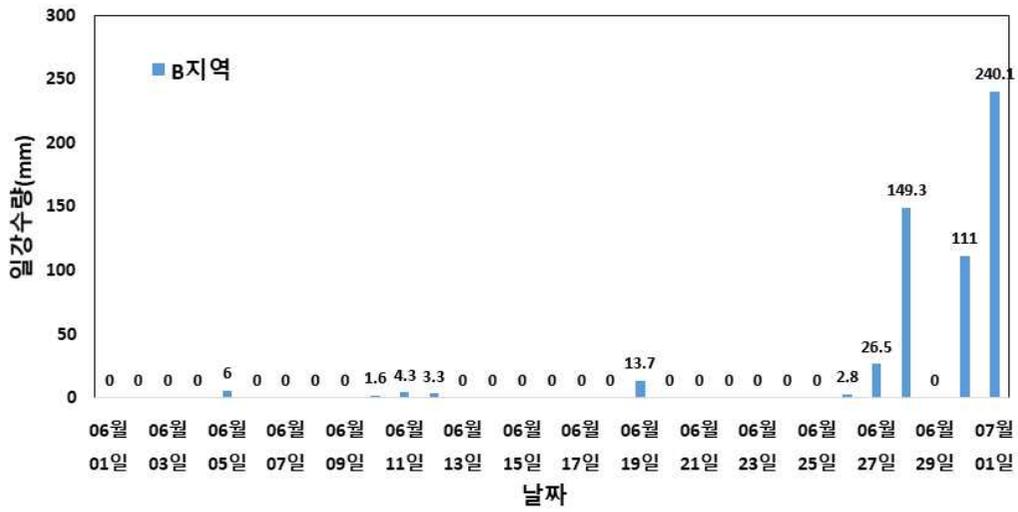
(2) B지역의 강우특성

B지역 산사태 현장의 강우분석을 위해 산악관측망 장비(ID:6909, 보성 봉화산)의 강우관측 자료를 분석하였다. 관내 기상관측소가 있으며, 강우량을 비롯한 기온, 풍속, 습도 등의 기상자료를 측정 및 제공하고 있다.

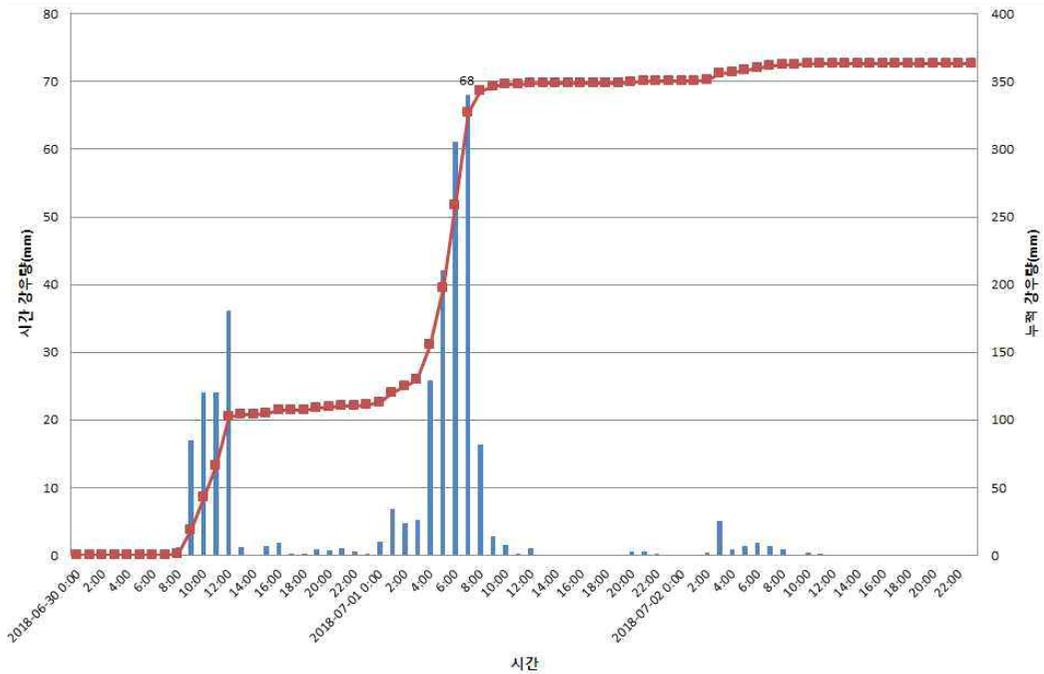
강우특성 분석 결과, 그림 3.13과 같이 산사태 피해 발생일까지 30일 동안 누적강우량은 558.6mm이며, 피해 발생 당일의 일강우량은 240.1mm이었다. 이는 기상청 자료 확인결과 2011. 7. 9. 발생한 일 최다강우량 260.5mm에 이은 두 번째 기록인 것으로 파악된다.

30일 동안의 전체 강우량 중에서 43%를 차지하는 것으로 여름철 강우가 집중되는 우리나라 특성을 고려하더라도 일강우량이 많았던 것으로 분석되었다. 또한, 산사태 발생 추정시간(7.1. 06:00)의 시우량은 68mm인 것으로 파악되었는데 이는 현재까지 기상청에서 기록된 최대시우량(2011.8.7.) 67mm를 상회하는 양으로 기록적 폭우가 발생하였던 것으로 파악된다.

이러한 강우량 특성을 분석한 결과 보성지역의 산사태 피해는 산사태 발생 전 발생한 선행강우로 지반이 약해져 있는 상태에서 단시간 집중호우 발생이 산사태 발생의 중요한 요인으로 파악된다.



(a) B지역의 일강수량(mm)



(b) B지역의 시간당 강수량(mm)

그림 3.13 B지역 강수량 분석

### 3.4 연구지역의 산사태 현장조사 결과

#### (1) A지역의 산사태 현장조사 결과

##### 1) 토석류 흐름

토석류의 흐름은 그림 3.14와 같이 상부로부터 하부에 이르기까지 크게 4 방향으로 흐른 것으로 판단된다. 즉, 상부에서 동측 방향 -> 서측 방향 -> 동측 방향 -> 서측 방향 등 지그재그로 유동한 것으로 판단된다.

##### 2) 분포 암종

노출된 암반을 관찰한 결과 그림 3.14(d)와 같이 기반암은 전반적으로 붉은색을 띠는 조립질 화강암으로 판정된다. 또한, 그림 3.14(c)와 같이 회색 및 연녹색의 치밀한 조직을 보이는 암편들이 퇴적층에서 다수 관찰되는데, 이는 화산암으로 판정된다.

##### 3) 풍화상태

그림 3.14(f)와 같이 바닥부분에서 관찰된 기반암인 화강암의 경우 입자들이 부분적으로 존재하기는 하나 완전히 풍화를 받은 상태로 풍화등급 5(완전풍화, Completely Weathered(CW))에 해당되는 것으로 판단된다. 반면, 그림 3.14(g)와 같이 비탈면 부분에서 관찰되는 화강암의 경우 불연속면의 주변부가 다소 변색되어 있고, 장석이 다소 풍화되어 있는 열린 절리의 경우 점토 등이 협재되어 있다. 그러나 일반적으로 암반이 신선한 상태를 보이고 강도도 신선한 암반과 큰 차이가 나지 않으므로 풍화등급 2(약간풍화, Slightly Weathered(SW))에 해당되는 것으로 판단된다.

##### 4) 콘크리트 구조물의 이동

상부의 계단식 옹벽 구조물로 추정되는 콘크리트 구조물의 경우 대부분 그림 3.14(a)와 그림 3.14(b)와 같이 동측의 토석류 흐름 방향으로 나열되어 있음이 관찰되었다. 또한, 콘크리트 구조물들은 대부분 토석류의 흐름 방향과 일치하여 배열되어 있음이 관찰된다. 그림 3.14(e)와 같이 보강토 옹벽 구조물들의 경우 주로 상부에 집중되어 토석류 흐름방향과 일치하게 나열되어 있음이 관찰되었다. 이는 구조

물들도 계단식 옹벽 콘크리트 구조물처럼 하부까지 이동된 것을 관찰하였다.

5) 인장균열의 확장 가능성

보통 균열은 한 번에 형성되지 않고, 여러 단계의 균열 확대와 연결을 통해 큰 균열이 형성되므로 이에 대한 것도 충분히 고려해야 할 필요성이 있다.



그림 3.14 A지역 산사태 현장조사

(2) B지역의 산사태 현장조사 결과

무인기로 촬영된 영상과 GIS분석 결과, 그림 3.15와 같이 산사태 발생면적은 1.32ha로 나타났으며, 본 피해지의 유하·퇴적부의 길이는 1호지 약 430여m, 2호지 약 300여m로 비교적 긴 편이다. 대상지 발생원 부근은 임도가 개설되어 있었으며, 임도변 성토사면 급경사지에서 붕괴가 발생하여 피해를 미쳤고, 발생원의 산사태 위험등급은 2등급지 이상인 것으로 파악되었다.

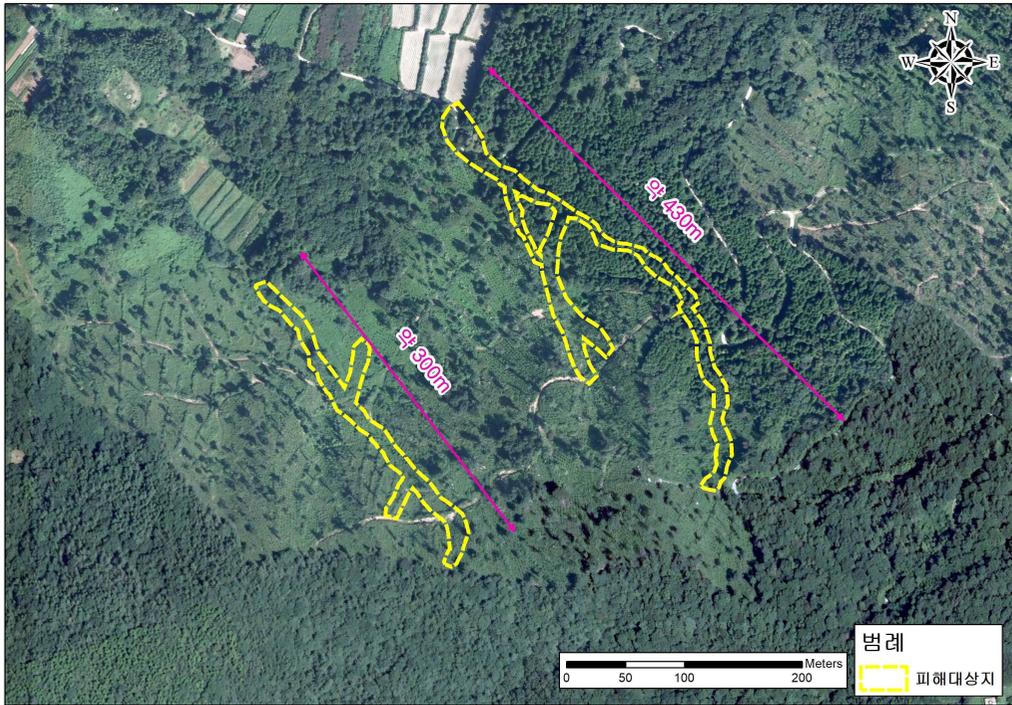


그림 3.15 B지역 피해지역 토석류 유하거리

조사지역에서 관찰되는 불연속면은 2방향성의 절리가 우세하게 발달되어 있다 (N18E/40SE, N40E/40NW). 또한, 산사태 방향이 임도사면 방향과 일치하며, 임도사면에서 관찰되는 사면파괴 형태는 암반의 경우 평면파괴와 쉼기파괴가 관찰되며 부분적으로 붕락도 관찰되었다. 산사태 발생지점은 토사층에서 발생하는 전형적인 원호파괴 형태이며, 임도사면 노두에서 다수의 암맥과 파쇄대도 관찰되었다.

현장조사 시 정확한 지하수위를 확인할 수 없었지만, 우기시 많은 양의 지표의 물이 절리나 틈 사이로 스며들었을 가능성이 높을 것으로 판단된다. 지반으로 침투

된 물은 지반의 전단저항력을 약화시켜 지반의 안정성에 부정적인 영향을 미치는 요인이 된다.

풍화로 인해 이미 느슨한 상태에 놓여있는 지반이기 때문에 물의 공급은 전단응력 증가와 사면 불안정성을 가속화시키는 요인이 된다. 즉, 조사지역 산사태 발생 원인은 폭우로 인한 지반 내 강우 침투로 지반의 전단저항력이 급속하게 약화되어 원호파괴가 발생한 것으로 판단되며, 지반 내 지표수 침투를 원활하게 한 요인으로 암석풍화로 인한 틈과 절리, 파쇄대 등이 큰 역할을 한 것으로 판단된다. 또한, 파이프 흐름현상이 주변에서 관측이 되고 있으며, 기반암에서 침출수가 나오는 것으로 보아 강우 시 용출수와 파이프 흐름이 산사태 발생의 중요한 원인일 것으로 판단된다.

그림 3.16과 같이 조사지역에 발달되어 있는 붕적토 내에 함유되어 있는 30~50cm 급의 자갈이상 크기의 재료 때문에 강우에 의해 침투된 지표하 흐름이 일반 토양에 비해 발달될 수도 있었을 것으로 판단된다.



(a) Piping 현황



(b) 붕적층 재료



(c) 노출암



(d) 노출암 절리

**그림 3.16 B지역 산사태 현장조사**

### 3.5 연구지역의 토질특성

일반적으로 강우로 발생하는 산사태는 집중호우가 내리는 동안 증가된 침투력과 간극수압에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다(Mathewson 등, 1990; Sitar 등, 1992; Montgomery 등, 2000). 자연사면에서 토층은 흙과 암편 등을 포함하는 미고결물질을 통칭하는 것(Varnes, 1978)으로 집중호우 등에 의해 증가된 간극수압으로 토층의 전단강도를 감소시키고 유효응력이 감소되어 결국 사면의 붕괴를 유발시킨다(Brand, 1981).

암반층 위에 존재하는 상부토층은 대부분 기반암의 풍화에 의해 퇴적된 것으로 이들은 지질조건 및 풍화정도에 따라 물리적, 역학적 특성이 달라진다(Hutchinson, 1988). 그리고 상부토층은 산사태가 일어나는 지층의 지질과 연관성을 가지며, 붕적토, 퇴적토, 잔류토 등의 퇴적물들은 산사태 지층의 암석풍화에 의하여 형성되므로 지층을 구성하고 있는 광물에 따라 토질특성도 다르게 나타난다(김원영 등, 2000).

우리나라의 자연사면 산사태는 토층을 구성하고 있는 사면 매질 즉, 토석류가 집중호우에 의해 지지력이 약해짐으로써 산사태가 발생하게 되며 산사태로 인한 산사태 물질의 대부분은 토석류이다(김경수 등, 2000). 김원영 등(1998, 2000, 2003, 2004)은 주로 집중호우로 인해 자연사면에서 발생된 토석류 산사태에 관한 연구를 수행하였으며, 기 발생된 산사태를 대상으로 여러 지질공학적 자료들을 조사하여 산사태에 영향을 미치는 인자들을 추출하고, 각 인자들간 상호관계의 통계적 분석을 통해 산사태의 발생 가능성을 확률론적으로 예측하였다. 한편, 김경수 등(2000, 2004, 2005)은 강우에 의해 산사태가 발생된 지역의 자연사면 토층을 대상으로 여러 토질시험을 실시하여 지질조건에 따른 토질특성을 평가하고, 산사태발생과 토질 인자들의 상관성을 분석하였다.

Giannecchini and Pochini(2003)는 산사태 지역과 아닌 지역간의 입도특성을 비교하였으며, 산사태 발생지역의 토층은 발생되지 않은 지역에 비해 낮은 액성한계를 가지고 있으며, 세립분이 많이 포함되어 있다고 하였다. 한편, Varnes(1978)는 산사태에서 토층의 입도분포는 매우 중요한 요소로 판단하였으며, 유동성 산사태의 경우 유동하는 물질에 대해 직경 2mm 이상의 입자를 20~80% 함유하면 암석 유동, 직경 2mm 미만의 입자를 80% 이상 함유하면 토양 유동으로 구분하였다.

2개의 연구지역에서 발생한 산사태도 대부분 기반암의 상부에 위치한 토층이 붕

괴되어 흐르는 유동성 산사태이다. 이러한 유동성 산사태는 사면의 표층을 구성하고 있는 토층 물질의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 지질 조건이 서로 다른 2개 지역을 대상으로 현장에서 채취된 토층 시료에 대한 실내시험을 실시하였으며, 그 결과로부터 지질별로 구분하여 산사태와 관련이 있는 여러 토질 특성을 평가하고 각 토질특성간의 상관관계를 분석하였다. 특히, 산사태와 토질특성간의 상관성 분석을 통해 산사태에 유의한 토질 인자 및 영향요소를 파악하고 지질조건에 따른 토질특성의 차별성을 분석하였다.

그림 3.17은 산사태 발생지역 현장조사 사진이다.



(a) A지역의 산사태 현장조사

(b) A지역의 토질특성 조사

**그림 3.17 산사태 지역에서의 현장조사**

### 3.5.1 물리적 시험결과

#### (1) 입도분포도 분석결과

그림 3.18은 2개 지역의 토층시료에 대한 입도시험결과를 지역별로 구분하여 시험결과들 중에서 대표적 시료의 입도분포곡선을 나타낸 것이다.

A지역의 화강암지역은 입도분포 곡선이 대체로 완만한 기울기를 보이고 입자크기별 혼합비율이 양호하며, 균등계수가 6.67~9.09의 범위이고 곡률계수는 1~3의 범위로서 대부분 입도조성이 양호한 토층으로 평가되었다. B지역의 편마암지역은 입도분포곡선이 대체로 완만한 기울기를 보이고 조립자와 세립자가 적당히 혼합되어 있으며, 균등계수가 9.40~17.2의 범위이고 곡률계수는 1~3의 범위로서 대부분 양입도의 조건을 충족함으로써 입도조성이 양호한 토층으로 평가되었다.

A지역 및 B지역 모두 모래크기 입자들의 구성비가 높고 실트나 점토크기의 세립들은 함유비율이 10% 내외로서 비교적 낮은편이다. 입도별 평균 함유비율을 지질별로 구분하여 살펴보면, A지역은 화강암지역으로 자갈 함유량은 평균 5.6%이고, 모래 함유량은 평균 85.5%, 세립자의 함유량은 평균 8.8%인 것으로 분석되었다. B지역은 편마암지역으로 자갈 함유량은 평균 15.1%이고, 모래 함유량은 평균 71.2%, 세립자의 함유비율은 13.8%인 것으로 분석되었다. 화강암 토층은 편마암 토층에 비해 모래의 비율이 높았으며, 편마암 토층은 자갈 및 세립분 함유량이 화강암 토층보다 높게 나타났다.

이러한 양상은 토층지반의 조성상태 및 풍화현상과 연관되는 지질특성에 기인한 결과로 볼 수 있다. 즉, 풍화에 강한 화강암지역은 모래크기 입자의 함유비율이 상대적으로 더 높은 반면에 풍화에 약한 편마암지역은 세립자의 함유비율이 더 높은 결과가 나타났다.

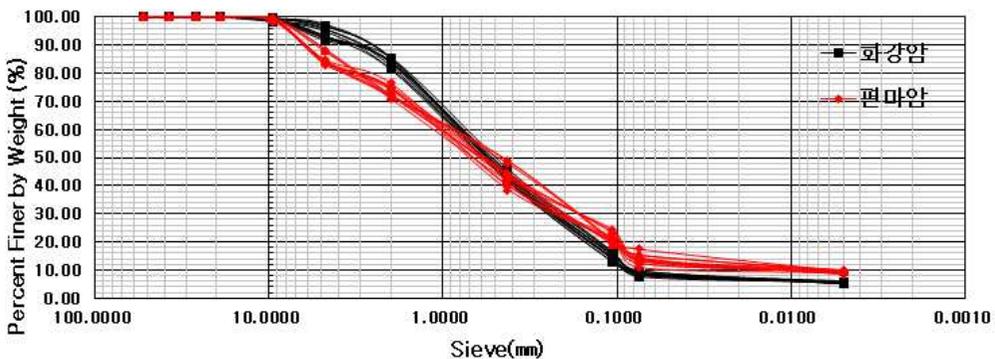


그림 3.18 연구지역 토층시료의 지질별 입도분포도

(2) 연경도 분석결과

일반적으로 높은 높은 함수비에서는 점차 액체와 같이 유동하나, 낮은 함수비에서는 고체와 같이 거동하게 된다. 따라서 강우로 인하여 토층에 침투가 발생할 경우 흙의 연경도는 변화하게 되며, 큰 액성한계를 지나는 토층은 작은 액성한계를 지나는 토층 보다 많은 함수비를 흡수함으로써 팽창으로 전단강도의 저하로 사면 파괴가 나타날 수 있다. 한편, 토층의 함수비가 액성한계에 달하거나 그보다 크게 되면 연약한 상태로 사면이 쉽게 붕괴 될 수 있다.

따라서 액성한계와 소성한계 등 연경도 시험을 실시하여 토층의 연경도를 고찰하였다. 2개 지역의 토층시료에 대한 액소성한계를 그림 3.19와 같이 나타내었다.

화강암 토층의 액성한계와 소성한계 평균은 25.3, 15.4%의 범위이고, 편마암 토층의 액성한계와 소성한계 평균은 25.9, 14.2%로 거의 유사한 경향성을 보였다.

이와 같이 액성한계와 소성한계로서 각 지질별로 연경도를 비교한 결과, 평균치에 있어 액성한계는 거의 동일한 결과를 보였으며, 소성한계는 화강암 토층이 높은 것으로 나타났다. 각 시료별 자연함수비를 액성한계에 대비하였을 때 편마암 및 화강암지역은 모든 토층시료의 자연함수비가 액성한계에 비해 더 낮게 나타나 강우에 의한 포화로 인해 토층의 지지력이 약해져 산사태가 발생할 가능성이 있음을 확인하였다.

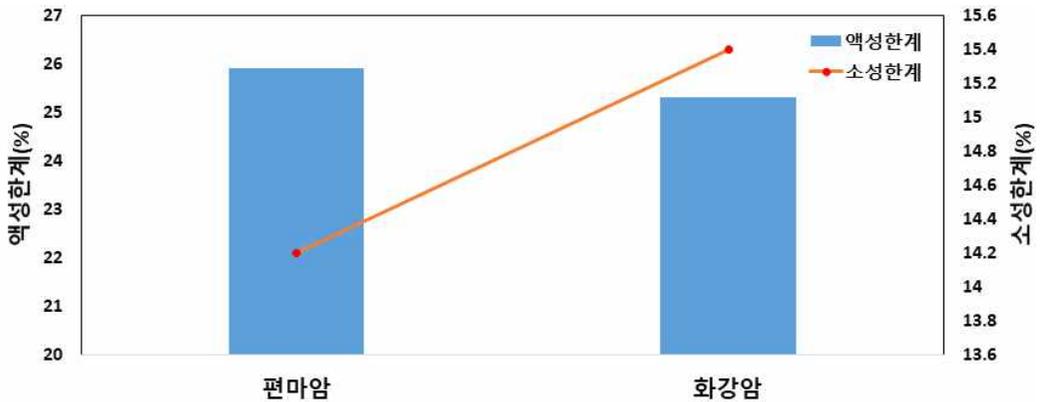


그림 3.19 연구지역 토층시료의 지질별 액소성한계

### (3) 간극률 및 단위중량 분석결과

자연상태의 토층에서 작은 입자는 큰 입자간의 간극을 채우기 때문에 같은 크기의 구에 비해서 간극비가 적어지게 되며, 다른 한편으로 입자의 불규칙적인 형상은 이상적인 구와 비교해서 간극비를 증가시키려는 경향이 있다. 그리고 이들 두 요인으로부터 실제의 흙에서 예상되는 간극비는 동일한 크기의 구로 생각했을 때 얻을 수 있는 것과 대략 같은 범위로 볼 수 있다(Braza, 1998).

자연사면의 토층에서 간극 상태는 간극률과 간극비로 표현되며 다짐은 상대밀도로 나타낼 수 있는데, 이들은 입도분포의 양상에 따라 달라지며 토층이 얼마나 느슨하고 조밀한가에 따른 다짐 상태와 밀접한 관계를 갖는다(김경수 등, 2005).

2개 지역 토층시료의 간극률 및 단위중량 시험결과를 지질별로 구분하여 그림 3.20과 같이 나타내었다. 화강암 토층의 간극비는 평균 0.78이고 간극률은 평균 43.7%인 것으로 나타났다. 그리고 습윤단위중량과 포화단위중량의 평균은  $1.56\text{t/m}^3$  및  $1.92\text{t/m}^3$ 이고, 건조단위중량은 평균  $1.49\text{t/m}^3$ 인 것으로 나타났다. 편마암 토층의 간극비는 평균 1.07이고 간극률은 평균 51.7%인 것으로 나타났다. 그리고 습윤단위중량과 포화단위중량의 평균은  $1.36\text{t/m}^3$  및  $1.80\text{t/m}^3$ 이고 건조단위중량은 평균  $1.29\text{t/m}^3$ 인 것으로 나타났다.

간극률은 편마암이 화강암 보다 큰 것으로 나타났으며, 건조단위중량은 간극률과는 반대로 화강암이 가장 크고 편마암이 작은 것으로 나타났다. 편마암은 간극률은 크고 건조단위중량은 상대적으로 작은 특징을 보였는데, 이는 모암의 광물조성 및 풍화양상에 따른 결과로 해석된다. 한편, 일반적으로 간극률이 크면 단위중량은 작고 간극률이 작으면 단위중량은 크게 나타나는 반비례적인 관계를 보이는 것으로 알려져 있는데, 본 연구를 통해서도 동일한 경향성을 보이는 것으로 나타났다.

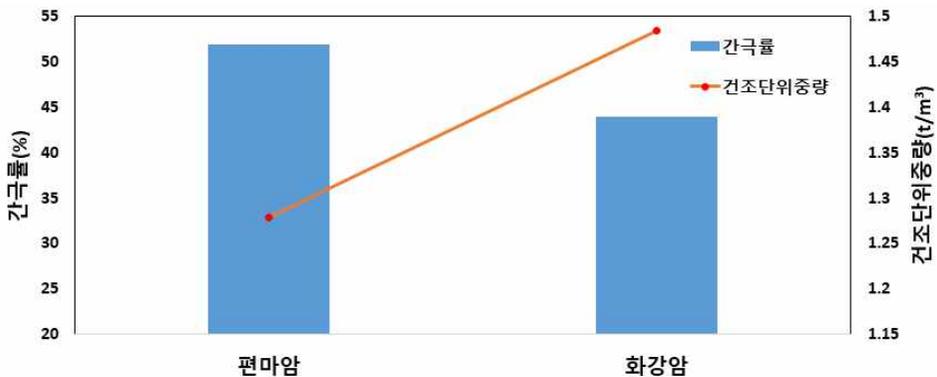


그림 3.20 연구지역 토층시료의 지질별 간극률 및 건조단위중량

### 3.5.2 역학적 시험결과

#### (1) 투수시험 분석결과

Darcy는 토층을 여러 등급으로 분류하였으며, 대표적으로 투수계수를 제시하였다. Braza(1998)에 따르면 토층의 투수성은 입도분포, 간극의 크기, 입자의 거칠기, 유체의 점성, 토층의 포화도 등 다양한 요인에 영향을 받으며 점성토에서 입자의 크기 등 구조는 투수계수와 매우 중요하게 관계가 있다고 하였다.

김경수 등(2000)은 대부분의 유동성 산사태들은 집중호우가 사면을 구성하고 있는 토층을 일차적으로 포화시킨 후 배수가 원활하지 못하여 단위중량을 증가시키는 요인으로 작용하고, 이차적으로는 전단강도가 저하되어 상대적으로 중력의 영향이 크게 작용함으로써 산사태 물질이 급격히 흘러내리는 양상을 나타낸다고 보고하였다.

이와 같이 산사태의 특성을 감안할 때, 자연사면이라도 투수계수가 크고 작음에 따라 산사태의 발생 가능성이 다를 수 있다.

그림 3.21은 투수시험으로부터 구한 2개 지역 토층시료의 투수계수를 평균치로 기준하여 나타낸 것이다. 화강암 토층의 투수계수는 평균  $6.49 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 이고, 편마암 토층의 투수계수는 평균  $1.37 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 인 것으로 나타났다. 이들은 모두 Darcy에 의하면 조립이나 중립질 모래 정도의 투수계수에 해당하는 것으로서 투수성이 보통~빠른 편의 지반으로 평가되었다.

이처럼 2개 지역의 투수시험 결과, 화강암 토층이 가장 큰 투수성 지반이고 다음으로 편마암 토층의 투수성이 작은 것으로 분석되었는데, 이는 주로 토층 물질의 입도특성에 좌우되는 것으로서 토층지반의 상대밀도를 나타내는 간극이나 단위중량 등과도 상관성이 있으며 궁극적으로는 지질조건과 관련된다고 볼 수 있다. 즉, Braza(1998)가 모래질과 세립토가 주를 이루는 편마암지역에 비해 대부분 자갈이 섞인 모래질의 화강암지역은 입도가 더 조립이어서 물의 통로가 되는 간극이 더 큰 것을 확인하였다. 한편, 산사태는 기반암과 그 상부토층과의 경계부에서 발생하므로 투수성이 양호하면 토층이 더 쉽게 포화될 수 있어 하중이 증가될 뿐만 아니라 유입수가 더 빠르게 사면 경계부에 침투됨으로 사면파괴요인으로 작용할 수 있다.

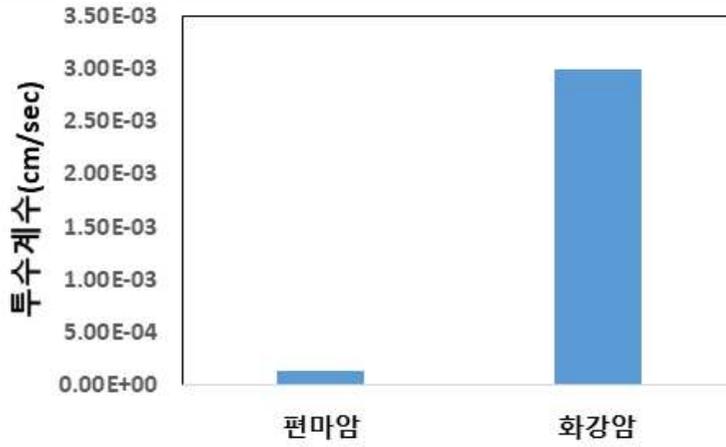


그림 3.21 연구지역 토층시료의 지질별 투수계수

(2) 전단강도 분석결과

Holtz and Gibbs(1956)는 모래지반을 여러 등급으로 분류하였으며, 대표적으로 내부마찰각을 제시하였다. 전단강도는 내부마찰각과 점착력으로 표시되는 것으로 사면의 형태와 더불어 사면파괴를 결정하는 매우 중요한 요소이다.

암반사면에서의 전단파괴는 불연속면의 특성에 좌우되므로 주로 불연속면의 전단 특성을 규명하는 것이 필요하고, 토층사면에서도 전단파괴면을 인지할 수 있을 경우 파괴면에 대한 전단특성을 규명하는 것이 중요하다. 자연사면의 산사태가 대부분 기반암의 상부에 위치한 토층이 붕괴되어 발생하는 것이므로 본 연구에서는 토층만을 대상으로 하여 전단특성을 파악하였다.

그림 3.22는 직접전단시험에 의한 2개 지역 토층시료의 전단강도를 점착력과 내부마찰각으로 구분하여 표현한 것이다. 화강암 토층의 점착력 및 내부마찰각은 평균  $8.4\text{kN/m}^2$  및  $31.2^\circ$  인 것으로 나타났는데, 이는 중간정도의 사질지반에 해당하는 값이다. 편마암 토층의 점착력 및 내부마찰각은 평균  $13.5\text{kN/m}^2$  및  $28.5^\circ$  인 것으로 나타났다. 이는 다짐도 느슨한 사질지반에 해당함을 알 수 있다.

이처럼 2개 지역 토층시료에 대한 전단시험 결과, 화강암 토층이 점착력은 낮으나 내부마찰각이 크게 나타난 지반이라 할 수 있으며, 편마암 토층은 점착력이 높고 내부마찰각이 낮게 나타난 지반이라 할 수 있다.

전단강도가 토층사면의 안정성과 밀접하게 관련되어 있음을 상기할 때, 이처럼 지질별로 서로 다른 전단강도 특성으로 인해 산사태가 발생할 조건 및 양상 또한 다르다고 볼 수 있을 것이다. 그리고 자연사면의 토층에서 산사태와 전단강도 즉, 점착력 및 내부마찰각은 서로 상관성이 있으며, 전단강도가 산사태발생에 유의한 영향인자로 간주된다.

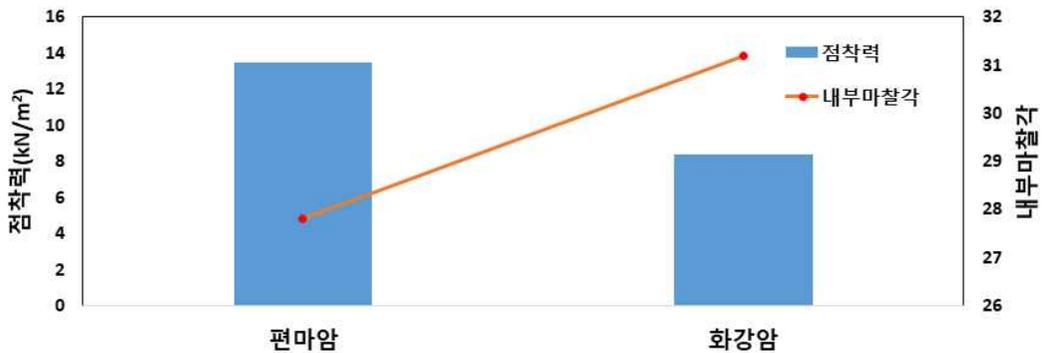


그림 3.22 연구지역 토층시료의 지질별 전단강도

### 3.5.3 지질별 산사태지역의 토질특성

집중호우로 인해 산사태가 밀집되어 발생한 지역을 대상으로 지질조건이 서로 다른 편마암, 화강암으로 구분하여 토질특성을 살펴본 결과, 지질별로 상이한 토질특성이 관찰되었다.

물리적 성질로서 2개 지역의 토층은 입도분포곡선이 대체로 완만한 기울기와 입도분포가 양호하여 균등계수와 곡률계수가 양입도의 조건을 충족함으로써 입도조성이 양호한 토층으로 평가되었다. 비중은 화강암 토층이 편마암 토층 보다 작게 나타났으며, 자연함수비는 화강암 토층이 더 크게 나타났다.

본 연구에서 시험을 통해 나타난 각 지질별 토층의 함수비, 액성한계, 소성한계 비중 등은 표 3.2와 같다.

액성한계 및 소성한계는 거의 유사한 경향성을 보였으며, 간극률은 편마암 토층이 화강암 토층에 비해 더 크고, 간극비도 편마암 토층에서 크게 나타났다. 건조단위중량은 화강암 토층이 편마암 토층에 비해 더 큰 것으로 나타났다. 시험을 통해 나타난 각 지질별 산사태 발생여부에 따른 토층의 지질별 점착력과 내부마찰각 전단특성은 지질조건에 따라 다소의 차이는 있으나 특징적으로 구분되지는 않는 것으로 분석되었다.

**표 3.2 연구지역 토층시료의 지반정수**

구분	전단강도		$\omega$ (%)	LL (%)	PL (%)	$\gamma_{sat}$ (t/m <sup>3</sup> )	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	$e$	$n$ (%)	$G_s$	$C_u$	$C_g$	자갈 (%)	세립 (%)	모래 (%)
	$c$ (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)														
A지역	4.5	30.5	11.6	20.4	11.0	1.49	1.88	1.41	0.74	42.5	2.63	6.7	2.3	2.7	4.2	82.3
화강암	9.6	33.2	19.8	28.1	19.9	1.60	1.95	1.52	0.88	46.8	2.65	8.4	3.0	8.6	9.9	89.1
평균	8.4	31.2	17.3	25.3	15.4	1.56	1.92	1.49	0.78	43.7	2.64	8.0	2.5	5.6	8.8	85.5
B지역	8.0	26.7	13.1	21.5	11.4	1.33	1.78	1.25	0.98	49.5	2.65	9.4	2.4	11.6	11.1	68.3
편마암	18.7	30.9	16.8	28.1	16.5	1.42	1.83	1.32	1.13	53.1	2.67	14.8	2.8	17.2	18.5	74.3
평균	13.5	28.5	14.6	25.9	14.2	1.36	1.80	1.29	1.07	51.7	2.66	11.8	2.6	15.1	13.8	71.2

## 제 4 장 지반정수 산정모델 개발

### 4.1 개요

산사태를 이해하기 위해서는 지반의 물리화학적 특성뿐만 아니라 전단특성에 대한 지식이 필요하다. 산사태 발생원인은 매우 다양하고 그 유발요인에 따라 지반특성이 다르게 나타난다. 일반적으로 지반의 투수특성은 주로 사면의 사전 안정성 및 붕괴 전후단계에서 나타나는 지반변형을 이해할 목적으로 사용된다. 여기서 포화 및 불포화 지반에 대한 응력변화는 사면의 안전을 산정에 중요한 인자이다. 또한, 전단특성은 사면의 안정성과 토석류 확산성 평가에 중요한 영향인자로 사용되고, 포화된 토층지반의 전단강도는 토석류의 이동거리와 이동속도에 영향을 미치게 된다. 그리고 전단특성은 배수, 압밀 및 전단속도 등의 제어조건에 따라 서로 다른 응력-변형 특성을 가지며, 강도특성은 응력이력, 입자간 상호작용, 결합력, 구조, 비등방성 및 간극률에 의존한다.

이와 같은 이유로 정확한 투수성과 지반강도를 구하기 위한 시험기기와 시험방법들이 개발되었다. 산사태 연구에서 투수시험은 포화된 정수두 및 변수두 방법과 불포화투수방법 등으로 투수계수를 구하고, 전단시험은 삼축, 링전단 및 직접전단 등의 방법으로 점착력 및 내부마찰각을 구하여 사면의 투수성과 전단특성을 파악하게 된다. 특히, 사면의 안정성은 토층이 수분으로 거의 포화상태에 이르고 최대전단응력에 달하게 될 때 급격히 저하됨으로써 붕괴에 이르게 된다. 그러나 이러한 산사태 발생조건에 해당하는 토층에서의 투수특성 및 전단특성을 재현하기란 쉽지가 않다. 따라서 이러한 난제들 때문에 포화상태에 의한 투수특성과 극히 제한된 전단속도에서 얻어진 전단특성에 의존하고 있다. 특히, 직접전단시험의 가장 큰 장점은 다른 시험방법에 비해 빠르고 간편하게 토층의 전단특성을 비교적 정확하게 규명할 수 있다는 점이다. 따라서 본 연구에서는 해당지역의 토층조건을 고려하여 포화상태의 토층시료에 대한 정수위투수시험과 직접전단시험을 수행하였다.

이처럼 산사태지역의 토질특성에서 주요 토질정수인 투수계수 및 전단강도를 측정하는 시험방법이 기본적인 물성시험들에 비해 복잡할 뿐만 아니라 시험자의 숙련도를 필요하다. 그리고 산사태가 발생한 지역에서의 토질특성을 파악하고 파괴메

커니즘을 규명하기 위해서는 여러 지점에 대한 투수계수와 전단강도 정수를 필요로 하기 때문에 시험자료를 얻기 위해서는 많은 시간과 비용이 소모되는 단점이 있다.

따라서 시험방법이 상대적으로 쉽고 간편할 뿐만 아니라 비용 또한 적게 소요되는 기본적 물성시험 결과를 이용하여 개략적으로 전단강도를 산정할 수 있다면 산사태 발생지역에서의 토질특성을 보다 빠르고 간편하게 파악할 수 있을 것이다. 산사태가 발생한 자연사면 토층에서 토질물성과 전단강도 정수 간의 상관성을 분석하고 그 상관식을 도출함으로써 독립변수(기본물성치)의 변화로부터 종속변수(전단강도)의 변화를 예측하는 것이 가능하다. 그리고 기본적인 토질물성치를 적용하여 전단강도를 개략적으로 산정하게 됨으로써 산사태지역에서의 토질특성을 보다 쉽고 빠르게 파악할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 통계적인 기법으로 상관성분석과 회귀분석이 활용되었다. 독립변수와 종속변수 간의 상관성을 분석하는 전통적인 통계방법으로는 상관성분석이 보편적으로 사용되고 있다. 상관성분석은 두 변수 사이의 선형관계가 있고 없음에 대하여 분석하는 것이다. 그리고 상관성분석에서는 두 변수사이의 관계가 있고 없음에 대한 추론이 그 주요 목적이다. 그러나 한 변수의 값으로부터 다른 변수의 값을 예측하고자 하는 경우가 흔히 있다. 이러한 경우에는 어떤 수학적 모형을 가정하고 그 자료로부터 모형을 추정하여 예측하거나 또는 통계적 추론을 통하여 상관식을 만들어내는 통계적 분석방법이 곧 회귀분석이다(김상익 등, 2000).

### 4.1.1 상관성 분석

상관성 분석에서 상관관계에 있다는 것은 변수간의 관계에서 둘 이상의 변수들에 있어 한 변수가 변함에 따라 다른 변수가 어떻게 변하는지 정도를 나타내는 것을 상관관계라 한다. 또한, 한 변수가 변하는 특성에 따라 다른 변수가 어떻게 변하는지 그 변동을 예측하는 방법이 상관성 분석이다.

상관관계는 한 변수의 분산 중에서 다른 변수와 같이 변화하는 분산 즉, 공분산이 어느 정도 되는가에 따라 결정된다. 상관분석에 있어서 또 하나의 중요한 것은 상관계수인데, 상관계수는 변수 간에 관계의 정도와 방향을 하나의 수치로 요약해서 표시해 주는 지수로서 0에서 1사이 절대값으로 표현된다. 이 때 0에 가까울수록 상관관계는 낮아지며, 절대값 1에 가까워질수록 상관관계는 높아지는 것을 의미한다.

또한, 변수관계의 방향은 +와 -로 표현되는데 증감의 방향이 같은 경우는 +의(양, 또는 정적인) 상관관계가 있는 것이며, 증감의 방향이 반대인 경우는 -의(음, 또는 부적인) 상관관계가 있음을 의미한다. 그림 4.1은 일반적인 상관관계를 표현한 것으로 권경득 등(2004)가 제시한 상관관계 그래프를 나타내었다.

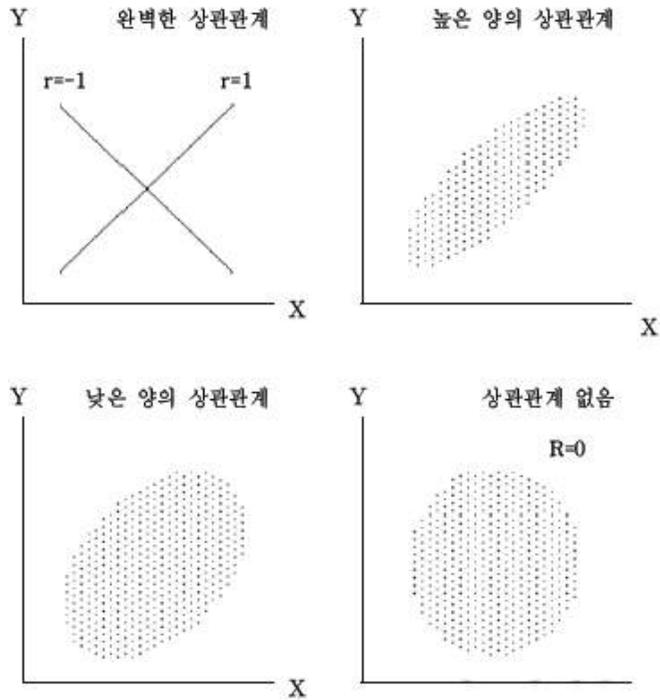


그림 4.1 상관분석에서 일반적인 상관관계 그래프(권경득 등, 2004)

상관분석에 있어서 상관계수  $R$ 의 절대값이 클수록 두 변수의 관계가 높다고 할 수는 있으나, 계수의 절대값이 작다고 그 가치가 중요하지 않다고 단정할 수는 없다. 따라서 다양한 분석기법을 사용하여 조사 및 해석 결과의 가치에 따라 그 상관관계를 파악해야 한다. 한편, 상관계수  $R$ 에 따른 상관관계 정도는 아래의 표 4.1에서 보는 바와 같다.

표 4.1 상관분석에서 상관계수  $R$ 에 따른 상관관계

상관계수 $R$	상관관계
$\pm 0.9$ 이상	상관관계가 아주 높다
$\pm 0.7 \sim 0.9$	상관관계가 높다
$\pm 0.4 \sim 0.7$	상관관계가 있다
$\pm 0.2 \sim 0.4$	상관관계가 있으나 낮다
$\pm 0.2$ 미만	상관관계가 거의 없다

또한, 유의확률  $p$ 계수는 대립가설(변수 간의 상관관계가 있음)과 귀무가설(변수 간의 상관관계가 없음)을 결정할 때 중요한 지표로 활용된다. 따라서, 유의확률  $p$ 의 계수에 따라  $p < 0.05$ 일 때 대립가설로 판단할 수 있으며,  $p > 0.05$ 일 때 변수 간의 상관관계가 없는 귀무가설이 채택될 수 있다.

이러한 상관관계의 특성은 상관관계에 있다는 것이 인과관계가 성립하지 않을 수도 있다는 것에 주의해야 한다. 즉, 독립변수( $X$ )와 종속변수( $Y$ )의 관계일 수도 있고, 아닐 수도 있는 것이다. 일반적으로 상관관계는 양의 방향인지 음의 방향인지 하는 관계의 방향이 포함되어 있고, 관계의 정도를 나타내는 상관계수는 확률적인 표현으로 나타난다.

이처럼 상관관계의 계수는 두 변수의 상관성에 대한 예측을 나타내는 것이고 측정치가 아닌 하나의 지수이므로 변수의 관계 비율이나 백분율과는 다르다. 따라서 상관관계 계수끼리의 가감승제는 불가능하고 상관관계의 결정계수는 상관관계 계수를 제곱하여 나오는 값이다.

### 4.1.2 회귀분석

상관성 분석을 수행한 후 상관계수를 이용하여 두 변수의 관계는 파악할 수 있으나, 변수와의 정확한 관계는 알기 어렵다. 따라서 둘 이상의 변수가 다른 하나의 변수에 미치는 영향을 파악하고, 독립변수에 따라 종속변수가 어떻게 변화하는지 분석하기 위해 한 변수의 값을 가지고 다른 변수의 값을 예측하는 방법이 바로 회귀분석이다.

상관관계와 비슷하나 회귀분석에서는 둘 이상의 변수가  $y = Bx + A$ 라는 직선의 방정식을 나타내어 더 정확하게 예측을 할 수 있다. 회귀분석은 상관분석과는 다르게 변수 간에 인과관계가 성립되어야 하며 정규분포성, 등간성 및 선형성 등의 조건이 필요하고 잔차 등을 검정해야 하는 복잡한 과정이 필요하다. 회귀분석은 회귀 방정식이라 할 수 있는  $y = Bx + A$ 라는 직선의 방정식을 구하는 것이다.

그림 4.2에서와 같이 두 집단의 분포그림에서 각 분포에서의 직선과 각 개별값들의 편차가 가장 적게 나타나는 가상의 직선들을 그어 보면, 편차는 모두 더하면 0으로 나오기 때문에 각 편차들을 제곱해서 만들어낸 값이 가장 작은 최소자승법이라고 불리는 가장 적합도가 높은 직선이 바로 회귀선이다(권경득 등, 2004).

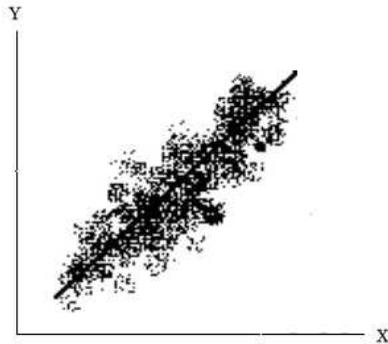


그림 4.2 회귀분석에서 최소자승선의 분포(권경득 등, 2004)

회귀분석은 독립변수(X)에 의하여 생기는 종속변수(Y)의 변화에 영향을 주는 값을 분석하고 기울기 B와 Y절편 A의 값을 구하는 것이다. B와 A의 값이 결정되어 회귀방정식을 구하면, 그 이후로는 X의 값만 있으면 바로 Y의 값이 얼마인지 예측할 수 있다.

단순선형회귀분석은  $y = Bx + A$ 와 같이 독립변수와 종속변수가 하나씩이며, 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 분석하고, 중다선형회귀분석은  $y = B_1x_1 + B_2x_2 + \dots + B_nx_n + A$ 와 같이 여러 독립변수가 동시에 한 종속변수에 미치는 영향을 분석하는 것이다.

종속변수와 독립변수의 분포에서 실제 분포된 종속변수의 값이 오차가 적은 직선을 찾아내는 과정을 최소자승법이라고 한다. 그리고 이 최적의 직선을  $y = Bx + A$ 와 같은 형태로 표현할 수 있는데, 이 최적의 선이 나오는 직선의 방정식을 회귀방정식이라고 하고, 기울기 B를 회귀계수라고 하며, A를 상수라고 한다. 이렇게 직선의 방정식을 구하여 인과관계를 예측하는 것을 회귀분석이라고 한다.

### 4.1.3 적용 통계프로그램

상관성 분석과 회귀분석은 일반적으로 통계프로그램을 사용하여 수행하는데, 본 논문에서 사용한 통계분석 프로그램은 SPSS라는 상용 프로그램으로써 데이터 입력, 데이터 집계, 데이터 관리를 하는 통계분석 도구이며, 가장 일반적으로 사용되고 있는 프로그램이라 할 수 있다.

1975년에 SPSS 매뉴얼이 발간되면서 세상에 알려지기 시작하였다. 최근에는 교육학, 심리학, 사회학, 경제학 및 경영학 등 사회과학 분야에서 조사, 분석에 가장 많이 사용되지만, 자연과학 분야에서의 조사, 분석에도 많이 사용되고 있다. 그리고 SPSS의 가장 큰 특징은 쉽게 설계된 그래픽기능이라 할 수 있는데, 대부분의 기능이 마우스를 클릭하는 것만으로 작동이 가능하므로 다른 통계프로그램에 비해 훨씬 많이 애용되고 있다.

SPSS의 대표적인 특징으로는 그래픽환경에서 시트형태의 데이터 입력, 자료처리 및 통계분석, 마우스를 이용한 메뉴와 대화상자의 분석처리, 대화형 그래픽 제공, 다양한 통계 등을 들 수 있다. SPSS는 표 4.2에서와 같은 기능을 가지고 있다.

**표 4.2 SPSS 통계프로그램의 여러 가지 기능**

작업과정	기능
데이터 관리	입력과 관리, 집계, 통계분석
통계분석	교차분석, 상관분석, 회귀분석, 분산분석, 판별분석, 요인분석 등
결과	표 및 그래프 제공

## 4.2 전단강도 산정모델

본 논문의 연구대상지역인 편마암, 화강암의 전단강도를 산정하기 위한 모델의 개발방법은 연구지역에서 채취한 토질시료에 대한 각종 물성시험 및 분석 자료들을 이용하여 상관성분석을 실시하였다. 그리고 상관성분석으로부터 전단강도와 관련성이 있는 토질인자들을 선별한 후 이들 선별된 인자들과 직접전단시험으로부터 구한 전단강도 즉, 점착력 및 내부마찰각에 대해 회귀분석을 실시하는 일련의 과정을 거쳐 전단강도 산정모델을 개발하였다.

그림 4.3은 전단강도 산정모델 개발을 위한 과정을 보여주는 흐름도이다.

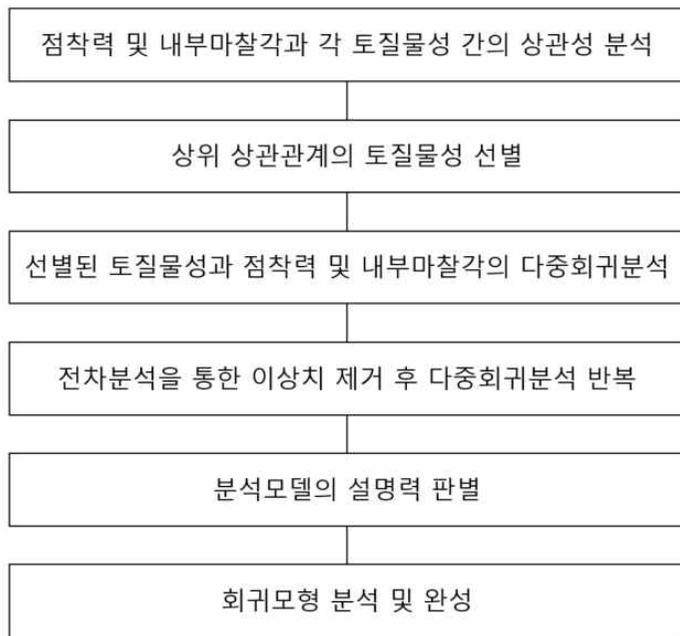


그림 4.3 전단강도 산정모델 개발을 위한 흐름도

### 4.2.1 화강암 토층의 점착력 산정모델

#### (1) 상관성 분석

점착력에 유의한 토질물성을 선별하기 위해 총 14개 항목의 토질물성에 대해 Pearson 상관분석법으로 서로 간의 상관관계를 분석하였다. 그리고 표 4.3에서 보는 바와 같이 화강암 토층의 점착력에 대해 각 토질물성과의 상관행렬 그래프를 작성하고 그 결과로부터 Pearson 상관계수 및 유의도를 얻었다.

**표 4.3 화강암 토층의 점착력과 토질물성 간의 상관계수 및 유의도**

종속변수 독립변수	점착력의 상관관계		종속변수 독립변수	점착력의 상관관계	
	r	P		r	P
비중	r	.121	액성한계	r	.364
	P	.708		P	.245
함수비(%)	r	-.277	소성한계	r	.378
	P	.384		P	.226
간극비	r	.173	자갈 함유율 (%)	r	.210
	P	.590		P	.513
간극률(%)	r	.185	모래 함유율 (%)	r	-.270
	P	.566		P	.397
습윤단위 중량(t/m <sup>3</sup> )	r	-.302	세립토 함유율(%)	r	.945
	P	.340		P	.001
포화단위 중량(t/m <sup>3</sup> )	r	-.135	균등계수	r	.613
	P	.675		P	.034
건조단위 중량(t/m <sup>3</sup> )	r	-.230	곡률계수	r	-.423
	P	.472		P	.170

표 4.3에서 보는 바와 같이 화강암 토층지반에서 점착력에 대해 유의수준이 높은 토질물성으로는 세립토 함유율 및 균등계수인 것으로 분석되었다. 따라서 화강암 토층지반에서 점착력에 대해 유의수준이 가장 높은 2개 토질인자 즉, 세립토 함유율 및 균등계수를 회귀분석에 적용할 독립변수로 선정하였다.

(2) 회귀분석

앞의 상관성 분석으로부터 화강암 토층지반의 점착력 산정모델을 만들기 위해 점착력에 대해 가장 상위의 상관관계로서 유의한 토질물성에 해당하는 세립토 함유율 및 균등계수를 이용하여 직접전단시험에 의한 점착력과의 다중회귀분석을 실시한 결과는 표 4.4 ~ 표 4.6과 같다.

회귀분석 결과에 의하면, 모델의 정확도를 나타내는 척도인 분산분석의 유의확률  $P < 0.001$ 로서 매우 우수하고, 설명력을 나타내는 수정된 R제곱이 약 88.0%로서 회귀모형이 적합하다는 것을 알 수 있다.

**표 4.4 화강암 토층의 회귀분석에 의한 점착력 모형요약 결과**

모형	R	R <sup>2</sup>	수정된 R <sup>2</sup>	추정값의 표준오차
1	.950	.902	.880	.44661

**표 4.5 화강암 토층의 회귀분석에 의한 점착력 분산분석 결과**

모형	제곱합	자유도	평균제곱	F	유의확률
선형회귀 분석	16.515	2	8.257	41.398	<.001
잔차	1.795	9	.199		
합계	18.310	11			

**표 4.6 화강암 토층의 회귀분석에 의한 점착력 모델분석 결과**

모형	비표준화 계수		표준화계수	t	유의확률
	B	표준오차	B		
(상수)	-1.533	1.978		-.775	.458
세립토 함유율	.924	.133	.879	6.947	<.001
균등계수	.275	.297	.117	.925	.379

따라서 최종적으로 화강암지역 토층지반의 점착력 산정모델은 모델계수 결과의 비표준화계수에 의해 식 (4.1)과 같이 정리될 수 있다.

$$c = (0.924 \times Fines) + (0.275 \times C_u) - 1.533 \quad (4.1)$$

여기서 Fines : 세립토함유율(%)

$C_u$  : 균등계수

$c$  : 점착력( $t/m^2$ )

화강암 토층지반에서는 이 점착력 산정모델을 적용할 경우 직접전단시험을 수행하지 않고도 물성시험에 의한 세립토함유율 및 균등계수만으로 개략적인 점착력을 구할 수 있을 것이다.

이문세 등(2009)은 전단강도 중 점착력 산정을 위하여 충남 지역의 토질특성과 전단강도에 대한 상관성을 분석하였다. 분석한 결과, 점착력은 간극비, 건조단위중량, 소성지수에 따라 식 (4.2)와 같이 나타내었다.

$$c = (0.037 \times e) + (0.003985 \times \gamma_d) + (-0.0018 \times PI) + 0.02417 \quad (4.2)$$

여기서  $e$  : 간극비

$\gamma_d$  : 건조단위중량( $t/m^3$ )

PI : 소성지수(%)

황의순(2014)은 전단강도 중 점착력 산정을 위하여 강원도 지역의 토질특성과 전단강도에 대한 상관성을 분석하였다. 분석한 결과, 화강암 토층의 점착력은 세립토함유율 및 포화도에 따라 식 (4.3)과 같이 나타내었다.

$$c = (-0.689 \times Fines) + (-0.0744 \times S) + 18.590 \quad (4.3)$$

여기서 S : 포화도(%)

선행연구와 비교·분석한 결과, 지역의 특성에 따라 점착력의 상관성은 차이가 나타났으나, 강원도 지역의 화강암 토층의 점착력은 세립토함유율이 동일한 상관관계 인자로 나타났으며, 충남 지역 토층의 점착력에서도 소성지수가 세립토함유율과 관계가 있으므로 세립토함유율에 따른 점착력의 상관성은 신뢰성이 있는 것으로 분석되었다. 또한, 강원도 지역의 동일한 화강암 토층의 산정모델 점착력과 비교해보면 세립토함유율이 유의확률이 매우 높아 유사성을 갖는 결과를 나타내어 화강암 토층의 점착력은 세립토함유율에 따라 점착력이 크게 영향을 받음을 확인할 수 있었다.

## 4.2.2 화강암 토층의 내부마찰각 산정모델

### (1) 상관성 분석

내부마찰각에 유의한 토질물성을 선별하기 위해 총 14개 항목의 토질물성에 대해 Pearson 상관분석법으로 서로 간의 상관관계를 분석하였다. 그리고 표 4.7에서 보는 바와 같이 화강암 토층의 내부마찰각에 대해 각 토질물성과의 상관행렬 그래프를 작성하고 그 결과로부터 Pearson 상관계수 및 유의도를 얻었다.

표 4.7 화강암 토층의 내부마찰각과 토질물성 간의 상관계수 및 유의도

종속변수 독립변수	내부마찰각의 상관관계		종속변수 독립변수	내부마찰각의 상관관계	
비중	r	-.066	액성한계	r	-.608
	P	.840		P	.036
함수비(%)	r	.463	소성한계	r	-.246
	P	.130		P	.441
간극비	r	-.790	자갈 함유율 (%)	r	.078
	P	.001		P	.810
간극률(%)	r	-.791	모래 함유율 (%)	r	-.006
	P	.001		P	.985
습윤단위 중량(t/m <sup>3</sup> )	r	.915	세립토 함유율(%)	r	-.239
	P	.001		P	.455
포화단위 중량(t/m <sup>3</sup> )	r	.824	균등계수	r	.075
	P	.001		P	.816
건조단위 중량(t/m <sup>3</sup> )	r	.843	곡률계수	r	-.176
	P	.001		P	.583

표 4.7에서 보는 바와 같이 화강암 토층지반에서 에 대해 유의수준이 높은 토질물성으로는 간극비, 간극률, 습윤단위중량, 포화단위중량, 건조단위중량으로 분석되었다. 그러나 5개의 인자 중 포화단위중량 및 습윤단위중량은 시료를 채취한 시점의 토층상태나 계절 및 일기 등에 큰 영향을 받으며, 간극률은 간극비와 상관성이 매우 높아 비례관계식으로 얻을 수 있으므로 중복적용을 피하기 위해 이들을 제외하였다. 따라서 화강암 토층지반에서 내부마찰각에 대해 유의수준이 가장 높은 2개

토질인자 즉, 간극비 및 건조단위중량을 회귀분석에 적용할 독립변수로 선정하였다.

(2) 회귀분석

앞의 상관성 분석으로부터 화강암 토층지반의 내부마찰각 산정모델을 만들기 위해 내부마찰각에 대해 가장 상위의 상관관계로서 유의한 토질물성에 해당하는 간극비 및 건조단위중량을 이용하여 직접전단시험에 의한 내부마찰각과의 다중회귀분석을 실시한 결과는 표 4.8 ~ 표 4.10과 같다.

회귀분석 결과에 의하면, 모델의 정확도를 나타내는 척도인 분산분석의 유의확률  $P < 0.001$ 로서 매우 우수하고, 설명력을 나타내는 수정된 R제곱이 약 84.0%로서 회귀모형이 적합하다는 것을 알 수 있다.

**표 4.8 화강암 토층의 회귀분석에 의한 내부마찰각 모형요약 결과**

모형	R	R <sup>2</sup>	수정된 R <sup>2</sup>	추정값의 표준오차
1	.932	.869	.886	.24851

**표 4.9 화강암 토층의 회귀분석에 의한 내부마찰각 분산분석 결과**

모형	제곱합	자유도	평균제곱	F	유의확률
선형회귀 분석	3.692	2	1.846	29.890	<.001
잔차	.556	9	.062		
합계	4.248	11			

**표 4.10 화강암 토층의 회귀분석에 의한 내부마찰각 모델분석 결과**

모형	비표준화 계수		표준화계수	t	유의확률
	B	표준오차	B		
(상수)	-53.241	24.397		-2.182	.057
간극비	23.269	9.228	1.643	2.522	.033
건조단위 중량	44.611	11.645	2.495	3.831	.004

따라서 최종적으로 화강암지역 토층지반의 내부마찰각 산정모델은 모델계수 결과의 비표준화계수에 의해 식 (4.4)와 같이 정리될 수 있다.

$$\phi = (23.269 \times e) + (44.611 \times \gamma_d) - 53.241 \quad (4.4)$$

여기서  $e$  : 간극비

$\gamma_d$  : 건조단위중량( $t/m^3$ )

$\phi$  : 내부마찰각( $^\circ$ )

화강암 토층지반에서는 이 내부마찰각 산정모델을 적용할 경우 직접전단시험을 수행하지 않고도 물성시험에 의한 간극비 및 건조단위중량만으로 개략적인 내부마찰각을 구할 수 있을 것이다.

이문세 등(2009)은 전단강도 중 내부마찰각 산정을 위하여 충남 지역의 토질특성과 전단강도에 대한 상관성을 분석하였다. 분석한 결과, 내부마찰각은 간극비, 건조단위중량에 따라 식 (4.5)와 같이 나타내었다.

$$\phi = (-4.813 \times e) + (6.451 \times \gamma_d) + 28.487 \quad (4.5)$$

황의순(2014)은 전단강도 중 내부마찰각 산정을 위하여 강원도 지역의 토질특성과 전단강도에 대한 상관성을 분석하였다. 분석한 결과, 화강암 토층의 내부마찰각은 세립토함유율 및 포화도에 따라 식 (4.6)과 같이 나타내었다.

$$\phi = (-0.875 \times e) + (33.640 \times \gamma_d) - 9.685 \quad (4.6)$$

선행연구와 비교·분석한 결과, 내부마찰각은 지역의 특성에 상관없이 간극비와 건조단위중량에 가장 큰 상관관계를 나타내는 것으로 나타나 내부마찰각의 상관성은 간극비와 건조단위중량에 영향을 받으며 신뢰성이 있는 것으로 확인되었다.

### 4.2.3 편마암 토층의 점착력 산정모델

#### (1) 상관성 분석

점착력에 유의한 토질물성을 선별하기 위해 총 14개 항목의 토질물성에 대해 Pearson 상관분석법으로 서로 간의 상관관계를 분석하였다. 그리고 표 4.11에서 보는 바와 같이 편마암 토층의 점착력에 대해 각 토질물성과의 상관행렬 그래프를 작성하고 그 결과로부터 Pearson 상관계수 및 유의도를 얻었다.

**표 4.11 편마암 토층의 점착력과 토질물성 간의 상관계수 및 유의도**

종속변수 독립변수	점착력의 상관관계		종속변수 독립변수	점착력의 상관관계	
	r	P		r	P
비중	r	.149	액성한계	r	-.117
	P	.644		P	.717
함수비(%)	r	.036	소성한계	r	-.115
	P	.912		P	.722
간극비	r	.186	자갈 함유율 (%)	r	-.022
	P	.562		P	.947
간극률(%)	r	.193	모래 함유율 (%)	r	-.213
	P	.549		P	.507
습윤단위 중량(t/m <sup>3</sup> )	r	-.258	세립토 함유율(%)	r	.805
	P	.417		P	.002
포화단위 중량(t/m <sup>3</sup> )	r	-.351	균등계수	r	.820
	P	.263		P	.001
건조단위 중량(t/m <sup>3</sup> )	r	-.272	곡률계수	r	-.211
	P	.392		P	.509

표 4.11에서 보는 바와 같이 편마암 토층지반에서 점착력에 대해 유의수준이 높은 토질물성으로는 세립토 함유율 및 균등계수인 것으로 분석되었다. 따라서 편마암 토층지반에서 점착력에 대해 유의수준이 가장 높은 2개 토질인자 즉, 세립토 함유율 및 균등계수를 회귀분석에 적용할 독립변수로 선정하였다.

(2) 회귀분석

앞의 상관성 분석으로부터 편마암 토층지반의 점착력 산정모형을 만들기 위해 점착력에 대해 가장 상위의 상관관계로서 유의한 토질물성에 해당하는 세립토 함유율 및 균등계수를 이용하여 직접전단시험에 의한 점착력과의 다중회귀분석을 실시한 결과는 표 4.12~4.14와 같다.

회귀분석 결과에 의하면, 모델의 정확도를 나타내는 척도인 분산분석의 유의확률  $P < 0.001$ 로서 매우 우수하고, 설명력을 나타내는 수정된 R제곱이 약 84.1%로서 회귀모형이 적합하다는 것을 알 수 있다.

**표 4.12 편마암 토층의 회귀분석에 의한 점착력 모형요약 결과**

모형	R	R <sup>2</sup>	수정된 R <sup>2</sup>	추정값의 표준오차
1	.933	.870	.841	1.01393

**표 4.13 편마암 토층의 회귀분석에 의한 점착력 분산분석 결과**

모형	제곱합	자유도	평균제곱	F	유의확률
선형회귀 분석	61.990	2	30.995	30.149	<.001
잔차	9.252	9	1.028		
합계	71.242	11			

**표 4.14 편마암 토층의 회귀분석에 의한 점착력 모델분석 결과**

모형	비표준화 계수		표준화계수	t	유의확률
	B	표준오차	B		
(상수)	-4.980	2.515		-1.981	.079
세립토 함유율	.551	.149	.519	3.696	.005
균등계수	.957	.244	.552	3.927	.003

따라서 최종적으로 편마암지역 토층지반의 점착력 산정모델은 모델계수 결과의 비표준화계수에 의해 식 (4.7)과 같이 정리될 수 있다.

$$c = (0.551 \times Fines) + (0.957 \times C_u) - 4.980 \quad (4.7)$$

여기서 Fines : 세립토함유율(%)

Cu : 균등계수

c : 점착력(t/m<sup>2</sup>)

편마암 토층지반에서는 이 점착력 산정모델을 적용할 경우 직접전단시험을 수행하지 않고도 물성시험에 의한 세립토함유율 및 균등계수만으로 개략적인 점착력을 구할 수 있을 것이다.

이문세 등(2009)은 식 (4.2)와 같이 전단강도 중 점착력 산정을 위하여 충남 지역의 토질특성과 전단강도에 대한 상관성을 분석하였고 점착력은 간극비, 건조단위중량, 소성지수에 따라 점착력과 상관관계가 있음을 확인하였다.

황의순(2014)은 전단강도 중 점착력 산정을 위하여 강원도 지역의 토질특성과 전단강도에 대한 상관성을 분석하였다. 분석한 결과, 편마암 토층의 점착력은 세립토함유율 및 균등계수에 따라 식 (4.8)과 같이 나타내었다.

$$c = (-0.712 \times Fines) + (-0.131 \times C_u) + 15.335 \quad (4.8)$$

선행연구와 비교·분석한 결과, 지역의 특성에 따라 점착력의 상관성은 차이가 나타났으나, 강원도 지역의 편마암 토층의 점착력은 세립토함유율 및 균등계수가 동일한 상관관계 인자로 나타났으며, 충남 지역 토층의 점착력에서도 소성지수가 세립토함유율과 관계가 있으므로 세립토함유율에 따른 점착력의 상관성은 신뢰성이 있는 것으로 분석되었다. 또한, 강원도 지역의 동일한 편마암 토층의 산정모델 점착력과 비교해 보면 세립토함유율 및 균등계수가 유사성을 갖는 결과를 나타내어 화강암 토층의 점착력은 세립토함유율 및 균등계수에 따라 점착력이 크게 영향을 받음을 확인할 수 있었다.

#### 4.2.4 편마암 토층의 내부마찰각 산정모델

##### (1) 상관성 분석

내부마찰각에 유의한 토질물성을 선별하기 위해 총 14개 항목의 토질물성에 대해 Pearson 상관성분석법으로 서로 간의 상관관계를 분석하였다. 그리고 표 4.15에서 보는 바와 같이 편마암 토층의 내부마찰각에 대해 각 토질물성과의 상관행렬 그래프를 작성하고 그 결과로부터 Pearson 상관계수 및 유의도를 얻었다.

표 4.15 편마암 토층의 내부마찰각과 토질물성 간의 상관계수 및 유의도

종속변수 독립변수	내부마찰각의 상관관계		종속변수 독립변수	내부마찰각의 상관관계	
	r	P		r	P
비중	r	.762	액성한계	r	-.179
	P	.004		P	.579
함수비(%)	r	.397	소성한계	r	-.253
	P	.202		P	.427
간극비	r	-.982	자갈 함유율 (%)	r	-.321
	P	.001		P	.309
간극률(%)	r	-.982	모래 함유율 (%)	r	.217
	P	.001		P	.498
습윤단위 중량(t/m <sup>3</sup> )	r	.961	세립토 함유율(%)	r	.149
	P	.001		P	.645
포화단위 중량(t/m <sup>3</sup> )	r	.984	균등계수	r	-.771
	P	.001		P	.003
건조단위 중량(t/m <sup>3</sup> )	r	.946	곡률계수	r	.196
	P	.001		P	.542

표 4.15에서 보는 바와 같이 편마암 토층지반에서 에 대해 유의수준이 높은 토질물성으로는 간극비, 간극률, 습윤단위중량, 포화단위중량, 건조단위중량으로 분석되었다. 그러나 5개의 인자 중 포화단위중량 및 습윤단위중량은 시료를 채취한 시점의 토층상태나 계절 및 일기 등에 큰 영향을 받으며, 비중은 12개 시료 결과가 거의 유사하고, 간극률은 간극비와 상관성이 매우 높아 비례관계식으로 얻을 수 있으므로 중복적용을 피하기 위해 이들을 제외하였다. 따라서 편마암 토층지반에서 내

부마찰각에 대해 유의수준이 가장 높은 2개 토질인자 즉, 간극비 및 건조단위중량을 회귀분석에 적용할 독립변수로 선정하였다.

(2) 회귀분석

앞의 상관성 분석으로부터 편마암 토층지반의 내부마찰각 산정모델을 만들기 위해 내부마찰각에 대해 가장 상위의 상관관계로서 유의한 토질물성에 해당하는 간극비 및 건조단위중량을 이용하여 직접전단시험에 의한 내부마찰각과의 다중회귀 분석을 실시한 결과는 표 4.16 ~ 표 4.18에서 보는 바와 같다.

회귀분석 결과에 의하면, 모델의 정확도를 나타내는 척도인 분산분석의 유의확률  $P < 0.001$ 로서 매우 우수하고, 설명력을 나타내는 수정된 R제곱이 약 96.6%로서 회귀모형이 적합하다는 것을 알 수 있다.

**표 4.16 편마암 토층의 회귀분석에 의한 내부마찰각 모형요약 결과**

모형	R	R <sup>2</sup>	수정된 R <sup>2</sup>	추정값의 표준오차
1	.986	.972	.966	.23806

**표 4.17 편마암 토층의 회귀분석에 의한 내부마찰각 분산분석 결과**

모형	제곱합	자유도	평균제곱	F	유의확률
선형회귀 분석	17.647	2	8.823	155.691	<.001
잔차	.510	9	.057		
합계	18.157	11			

**표 4.18 편마암 토층의 회귀분석에 의한 내부마찰각 모델분석 결과**

모형	비표준화 계수		표준화계수	t	유의확률
	B	표준오차	B		
(상수)	-10.980	43.482		-.253	.806
간극비	-5.589	14.665	-.187	-.381	.712
건조단위 중량	35.364	21.672	.800	1.632	.137

따라서 최종적으로 편마암지역 토층지반의 내부마찰각 산정모델은 모델계수 결과의 비표준화계수에 의해 식 (4.9)와 같이 정리될 수 있다.

$$\phi = (-5.589 \times e) + (35.364 \times \gamma_d) - 10.980 \quad (4.9)$$

여기서  $e$  : 간극비

$\gamma_d$  : 건조단위중량( $t/m^3$ )

편마암 토층지반에서는 이 내부마찰각 산정모델을 적용할 경우 직접전단시험을 수행하지 않고도 물성시험에 의한 간극비 및 건조단위중량만으로 개략적인 내부마찰각을 구할 수 있을 것이다.

이문세 등(2009)은 식 (4.5)와 같이 전단강도 중 내부마찰각 산정을 위하여 충남 지역의 토질특성과 전단강도에 대한 상관성을 분석하였고 내부마찰각은 간극비, 건조단위중량에 따라 점착력과 상관관계가 있음을 확인하였다.

황의순(2014)은 전단강도 중 내부마찰각 산정을 위하여 강원도 지역의 토질특성과 전단강도에 대한 상관성을 분석하였다. 분석한 결과, 편마암 토층의 내부마찰각은 간극비 및 건조단위중량에 따라 식 (4.10)과 같이 나타내었다.

$$\phi = (-12.594 \times e) + (27.01 \times \gamma_d) + 6.018 \quad (4.10)$$

선행연구와 비교·분석한 결과, 내부마찰각은 지역의 특성, 토층의 특성에 상관없이 간극비와 건조단위중량에 가장 큰 상관관계를 나타내는 것으로 나타나 내부마찰각의 상관성은 간극비와 건조단위중량에 영향을 받으며 신뢰성이 있는 것으로 확인되었다.

### 4.3 지반정수 산정모델의 유효성 검증

본 연구에서는 통계적인 기법으로 상관성 분석과 회귀분석이 활용되었다. 독립변수와 종속변수 간의 상관성을 분석하는 전통적인 통계방법으로는 상관성 분석이 보편적으로 사용되고 있다. 상관성 분석은 두 변수 사이의 선형관계가 있고 없음에 대하여 분석하는 것이다. 그리고 상관성 분석에서는 두 변수 사이의 관계를 분석하는데 목적이 있으며, 변수들 사이에 구체적으로 어떠한 함수적인 관계가 있는가를 파악하고자 하는 것은 아니다. 그러나 한 변수의 값이 변할 경우 다른 변수의 값을 예측하고자 하는 경우가 흔히 있다. 이러한 경우에는 어떤 수학적 모형을 가정하고 그 자료로부터 모형을 추정하여 예측하거나 통계적 추론을 통하여 상관식을 만들어내는 통계적 분석방법이 곧 회귀분석이다(김상익 등, 2000).

본 논문에서 개발된 토질정수 산정모델은 몇 가지 토질물성을 이용하여 자연사면 토층지반에 대해 토질시험을 직접 수행하지 않고도 개략적으로 전단강도를 쉽고 간편하게 산정할 수 있도록 하기 위함이다. 그러나 이러한 필요성에 의해 상관성분석과 회귀분석 과정을 통해 개발된 각각의 모델에 물성자료를 적용하여 산정된 전단강도는 직접 시험을 실시하여 얻어진 결과치가 아니기 때문에 그 유효성을 확인할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 토질정수 산정모델에 의해 계산된 결과치와 실제 시험에 의한 결과치를 비교하는 검증과정을 거침으로써 개발한 모델의 신뢰성을 확보하고자 한다.

이러한 일련의 토질정수 산정모델의 유효성 검증은 두가지 방법으로 수행하였다. 그 첫번째 방법은 모델을 개발하기 위해 지질별로 구분하여 산사태 발생지역으로부터 채취한 각각의 토질시료에 대해 직접 시험을 실시한 투수계수, 점착력 및 내부마찰각 결과치와 본 연구에서 개발한 모델을 적용하여 산정된 이들 토질정수 결과치를 상호 비교하는 것이다.

두번째 방법은 각 지질별로 산사태발생지역과 동일한 지역의 미발생지역으로부터 채취한 토질시료에 대해 제반 토질시험을 실시한 투수계수, 점착력 및 내부마찰각 결과치와 본 연구에서 개발한 모델을 적용하여 산정된 이들 토질정수 결과치를 상호 비교하는 것이다. 이들 두가지 방법에 의한 검증은 지질별로 구분한 개별 시료들에 대해 각각의 토질정수를 시험결과치와 모델결과치로 나누어 그래프에 도시함으로써 그 값의 차이와 경향성을 정성적으로 비교하는 방식으로 검토하였다.

이를 요약하여 정리하면, 일차적으로는 산사태 발생지역 총 2개 지역(A, B지역)으로부터의 전단강도 산정모델 개발을 위해 시료를 채취하여 실험한 직접전단시험 결과와 개발된 전단강도 산정모델식을 적용한 전단강도와 비교하여 점착력과 내부마찰각을 검증하였다. 또한, 산사태 발생 인근지역 산사태가 미발생된 위치에서 전단강도 산정모델 검증을 위해 시료를 채취하여 직접시험을 수행한 결과와 개발된 전단강도 산정모델식을 적용한 전단강도와 비교하여 점착력과 내부마찰각의 유효성을 검증하였다.

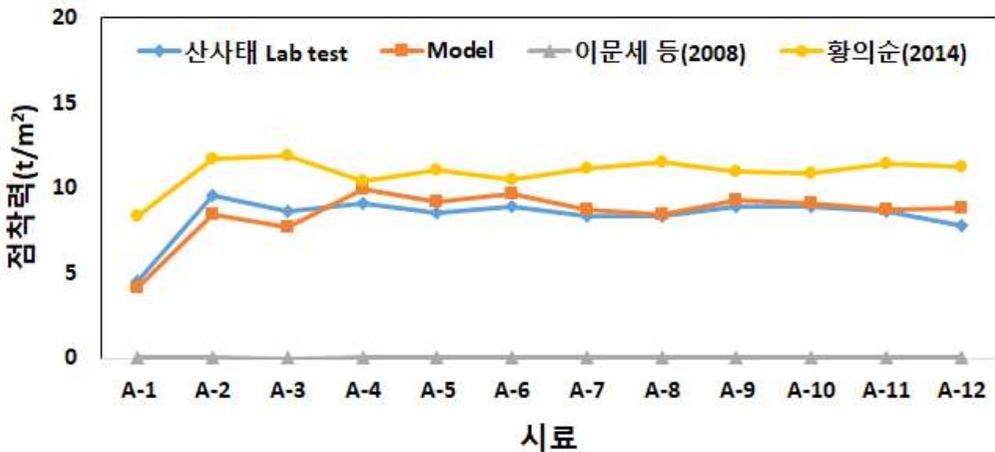
### 4.3.1 화강암 토층의 점착력 산정모델 검증

화강암 토층의 산사태 발생지역인 A지역의 토층지반을 대상으로 하여 개발한 점착력 산정모델의 유효성을 검증하고자 하였다. 산사태 Lab test의 점착력은 산사태가 발생한 지역에서 시료를 채취하여 직접전단시험을 수행한 결과값이며, Model의 점착력은 산사태 Lab test에 사용된 시료의 세립분함유율과 균등계수를 구하여 개발된 점착력 산정모델 식 (4.1)에 대입하여 나타난 점착력으로 두가지 점착력을 비교하여 개발된 점착력의 산정모델을 검증하였다. 또한, 인근지역 Lab test의 점착력은 산사태 발생 인근에 산사태 미발생 구간에서 시료를 채취하여 직접전단시험을 수행한 결과값이며, Model의 점착력은 인근지역 Lab test에 사용된 시료의 세립분함유율과 균등계수를 구하여 개발된 점착력 산정모델 식 (4.1)에 대입하여 나타난 점착력으로 두가지 점착력을 비교하여 개발된 점착력의 유효성을 검증하였다. 이들 각각의 시료에 대해 직접시험에 의한 점착력과 모델을 적용하여 산정된 점착력을 비교한 결과는 그림 4.4와 같다.

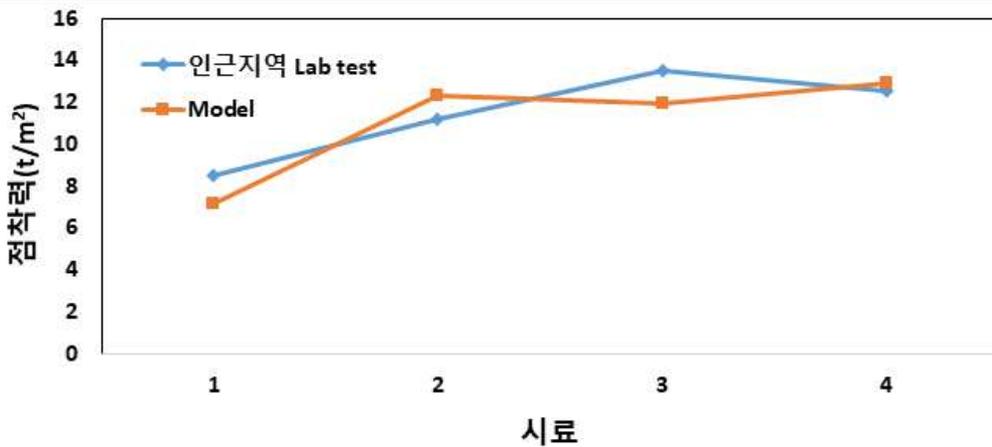
그림 4.4(a)는 모델개발을 위해 산사태가 발생한 화강암 토층으로부터 채취한 토질시료에 대해 직접전단시험에 의한 점착력과 개발된 점착력 산정모델식에 의해 결정된 점착력을 비교한 것이다. 전체적으로 두 가지 방법으로 구한 개별 시료의 점착력이 거의 유사한 경향성을 보임으로써 상관성이 높음을 알 수 있다. 즉, 모델개발을 위해 직접시험에 의한 점착력이 큰 토질시료는 개발된 모델에 의해 산정된 점착력도 크게 나타나고, 직접시험에 의한 점착력이 작은 토질시료는 모델에 의해 산정된 점착력 또한 작게 나타나는 일관성을 보였다. 또한, 기존 선행연구 분석 결과 이문세 등(2008)의 식과는 맞지 않는 것으로 나타났으나, 황의순(2014)의 결과와 유사한 경향을 나타냄을 확인하였다.

그림 4.4(b)는 모델검증을 위해 산사태가 발생한 인근지역 산사태 미발생 구간에서 화강암 토층으로부터 채취한 토질시료에 대해 직접전단시험에 의한 점착력과 개발된 점착력 산정모델식에 의해 결정된 점착력을 비교한 것이다. 이 경우 역시 두 가지 방법으로 구한 시료의 점착력이 거의 유사한 경향성을 보임으로써 상관성이 높은 것으로 나타났다. 즉, 모델검증을 위해 직접시험에 의한 점착력이 큰 토질시료는 개발된 모델에 의해 산정된 점착력도 크고, 작은 토질시료는 따라서 작게 나타나는 일관성을 보였다.

이처럼 두가지 경우로 구분하여 본 연구에서 개발한 점착력 산정모델의 유효성을 검증한 결과 대체적으로 높은 상관성을 가지는 것으로 나타남으로써 연구지역과 같은 화강암 지역의 토층지반에서 점착력을 산정하기 위해 본 점착력 산정모델을 적용할 수 있는 것으로 판단된다. 그리고 본 연구에서 제안한 모델을 활용할 경우 직접 전단시험을 수행하지 않고 일부 토질물성만으로도 해당 토층지반에서의 전단 강도를 개략적으로 추정하거나 어느 정도 예측이 가능할 것이다.



(a) 산사태 발생 구간 직접전단 실내실험 결과 및 모델식 검증



(b) 인근지역 산사태 미발생 구간 직접전단 실내실험 결과 및 모델식 검증

그림 4.4 화강암 지역의 직접전단시험에 의한 점착력과 산정모델에 대한 검증

### 4.3.2 화강암 토층의 내부마찰각 산정모델 검증

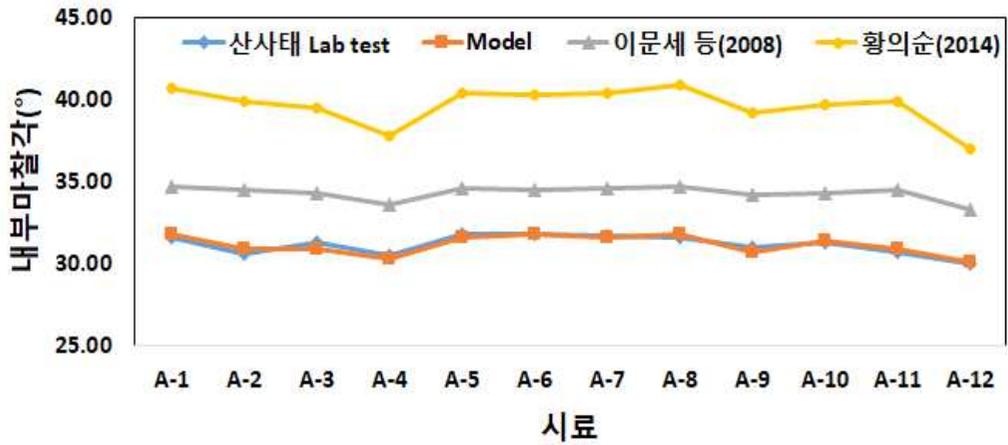
화강암 지역의 산사태발생지역 토층지반을 대상으로 하여 개발한 내부마찰각 산정모델의 유효성을 검증하기 위하여 총 12개 시료에 대한 시험결과가 활용되었다. 이들 시료는 “모델개발을 위해 직접시험에 의한 내부마찰각” 4개 및 “모델검증을 위해 직접시험에 의한 내부마찰각” 4개로 구분된다. 이들 각각의 시료에 대해 직접 시험에 의한 내부마찰각과 모델을 적용하여 산정된 내부마찰각을 비교한 결과는 그림 4.5와 같다.

그림 4.5(a)는 모델개발을 위해 산사태가 발생한 화강암 토층으로부터 채취한 토질시료에 대해 직접시험에 의한 내부마찰각과 모델에 의해 산정된 내부마찰각을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 두 가지 방법으로 구한 개별 시료의 내부마찰각이 거의 유사한 경향성을 보임으로써 상관성이 높음을 알 수 있다. 즉, 모델개발을 위해 직접시험에 의한 내부마찰각이 큰 토질시료는 개발된 모델에 의해 산정된 내부마찰각도 크게 나타나고, 직접시험에 의한 내부마찰각이 작은 토질시료는 모델에 의해 산정된 내부마찰각 또한 작게 나타나는 일관성을 보였다. 또한, 기존 선행연구 분석 결과 이문세 등(2008)의 결과와 유사한 경향을 나타내었으며, 황의순(2014)의 결과와는 유사한 경향을 나타내나 편차가 있는 것을 확인하였다.

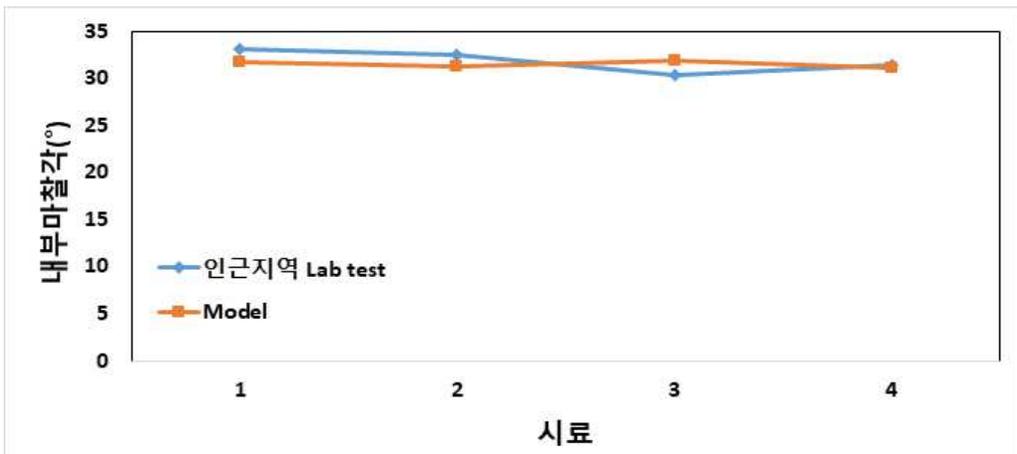
그림 4.5(b)는 모델검증을 위해 산사태가 발생한 인근 화강암 토층으로부터 채취한 토질시료에 대해 직접시험에 의한 내부마찰각과 모델에 의해 산정된 내부마찰각을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 이 경우 역시 두 가지 방법으로 구한 개별 시료의 내부마찰각이 거의 유사한 경향성을 보임으로써 상관성이 높은 것으로 나타났다. 즉, 모델검증을 위해 직접시험에 의한 내부마찰각이 큰 토질시료는 개발된 모델에 의해 산정된 내부마찰각도 크고, 작은 토질시료는 따라서 작게 나타나는 일관성을 보였다.

이처럼 두가지 경우로 구분하여 본 연구에서 개발한 내부마찰각 산정모델의 유효성을 검증한 결과 대체적으로 높은 상관성을 가지는 것으로 나타남으로써 연구지역과 같은 화강암 지역의 토층지반에서 내부마찰각을 산정하기 위해 본 내부마찰각 산정모델을 적용할 수 있는 것으로 판단된다. 그리고 본 연구에서 제안한 모델을 활용할 경우 직접 전단시험을 수행하지 않고 일부 토질물성만으로도 해당 토층

지반에서의 전단강도를 개략적으로 추정하거나 어느 정도 예측이 가능할 것이다.



(a) 산사태 발생 구간 직접전단 실내실험 결과 및 모델식 검증



(b) 인근지역 산사태 미발생 구간 직접전단 실내실험 결과 및 모델식 검증

그림 4.5 화강암 지역의 직접전단시험에 의한 내부마찰각과 산정모델에 대한 검증

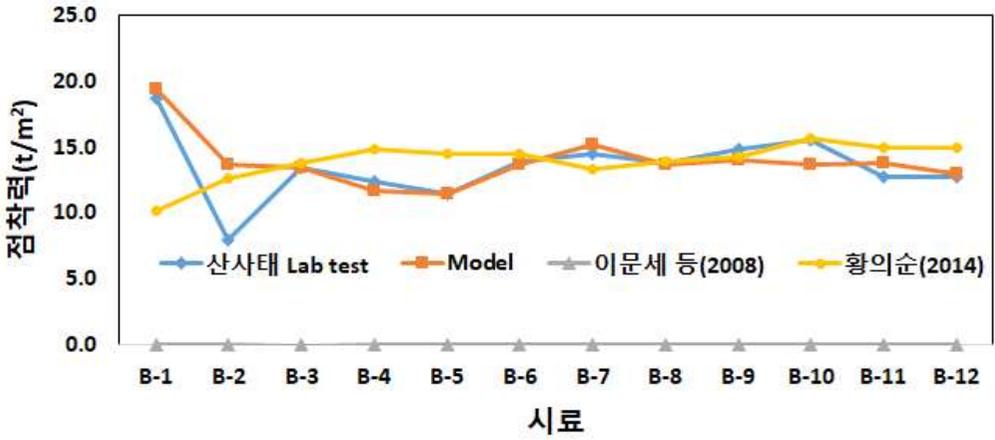
### 4.3.3 편마암 토층의 점착력 산정모델

편마암 지역의 산사태발생지역 토층지반을 대상으로 하여 개발한 점착력 산정모델의 유효성을 검증하기 위하여 총 12개 시료에 대한 시험결과가 활용되었다. 이들 시료는 “모델개발을 위해 직접시험에 의한 점착력” 4개 및 “모델검증을 위해 직접시험에 의한 점착력” 4개로 구분된다. 이들 각각의 시료에 대해 직접시험에 의한 점착력과 모델을 적용하여 산정된 점착력을 비교한 결과는 그림 4.6과 같다.

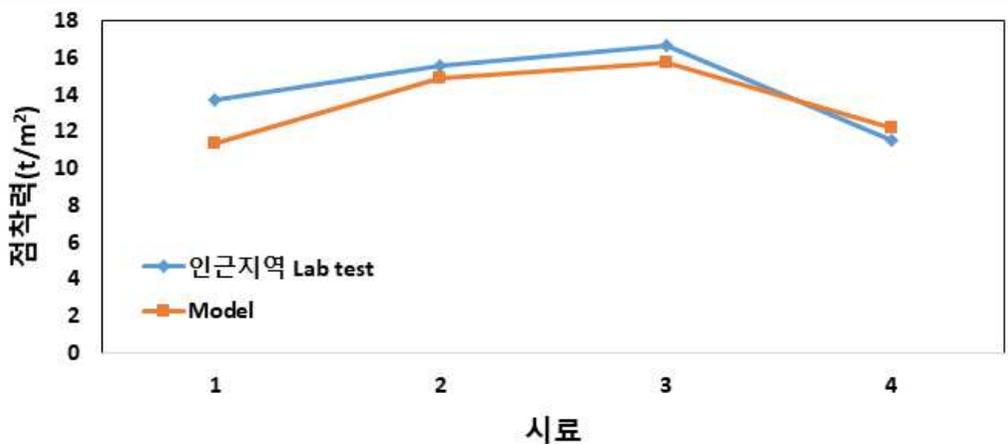
그림 4.6(a)는 모델개발을 위해 산사태가 발생한 편마암 토층으로부터 채취한 토질시료에 대해 직접시험에 의한 내부마찰각과 모델에 의해 산정된 내부마찰각을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 두 가지 방법으로 구한 개별 시료의 점착력이 거의 유사한 경향성을 보임으로써 상관성이 높음을 알 수 있다. 즉, 모델개발을 위해 직접시험에 의한 점착력이 큰 토질시료는 개발된 모델에 의해 산정된 점착력도 크게 나타나고, 직접시험에 의한 점착력이 작은 토질시료는 모델에 의해 산정된 점착력 또한 작게 나타나는 일관성을 보였다. 또한, 기존 선행연구 분석 결과 이문세 등(2008)의 식과는 맞지 않는 것으로 나타났으나, 황의순(2014)의 결과와 유사한 경향을 나타냄을 확인하였다.

그림 4.6(b)는 모델검증을 위해 산사태가 발생한 인근 편마암 토층으로부터 채취한 토질시료에 대해 직접시험에 의한 점착력과 모델에 의해 산정된 점착력을 비교한 것이다. 이 경우 역시 두 가지 방법으로 구한 개별 시료의 점착력이 거의 유사한 경향성을 보임으로써 상관성이 높은 것으로 나타났다. 즉, 모델검증을 위해 직접시험에 의한 점착력이 큰 토질시료는 개발된 모델에 의해 산정된 점착력도 크고, 작은 토질시료는 따라서 작게 나타나는 일관성을 보였다.

이처럼 두가지 경우로 구분하여 본 연구에서 개발한 점착력 산정모델의 유효성을 검증한 결과 대체적으로 높은 상관성을 가지는 것으로 나타남으로써 연구지역과 같은 편마암 지역의 토층지반에서 점착력을 산정하기 위해 본 점착력 산정모델을 적용할 수 있는 것으로 판단된다. 그리고 본 연구에서 제안한 모델을 활용할 경우 직접 전단시험을 수행하지 않고 일부 토질물성만으로도 해당 토층지반에서의 전단강도를 개략적으로 추정하거나 어느 정도 예측이 가능할 것이다.



(a) 산사태 발생 구간 직접전단 실험 결과 및 모델식 검증



(b) 인근지역 산사태 미발생 구간 직접전단 실험 결과 및 모델식 검증

그림 4.6 편마암 지역의 직접전단시험에 의한 점착력과 산정모델에 대한 검증

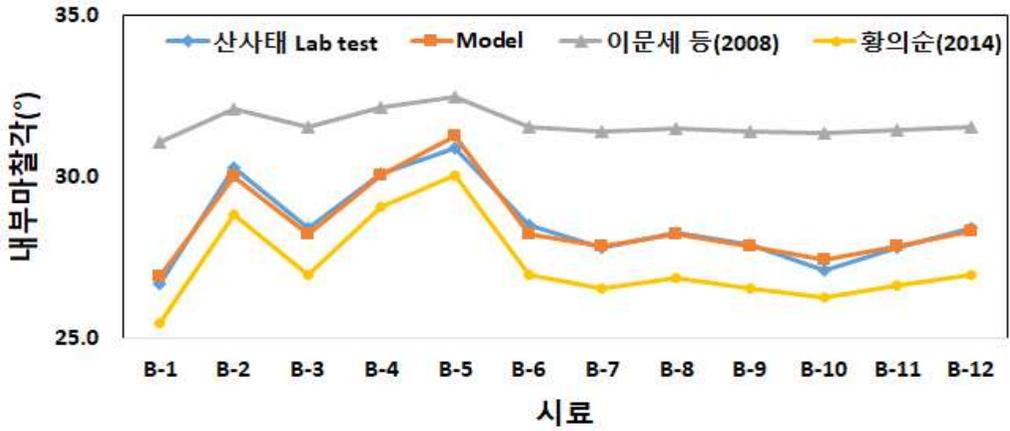
#### 4.3.4 편마암 토층의 내부마찰각 산정모델

편마암 지역의 산사태발생지역 토층지반을 대상으로 하여 개발한 내부마찰각 산정모델의 유효성을 검증하기 위하여 총 4개 시료에 대한 시험결과가 활용되었다. 이들 시료는 “모델개발을 위해 직접시험에 의한 내부마찰각” 4개 및 “모델검증을 위해 직접시험에 의한 내부마찰각” 4개로 구분된다. 이들 각각의 시료에 대해 직접 시험에 의한 내부마찰각과 모델을 적용하여 산정된 내부마찰각을 비교한 결과는 그림 4.7과 같다.

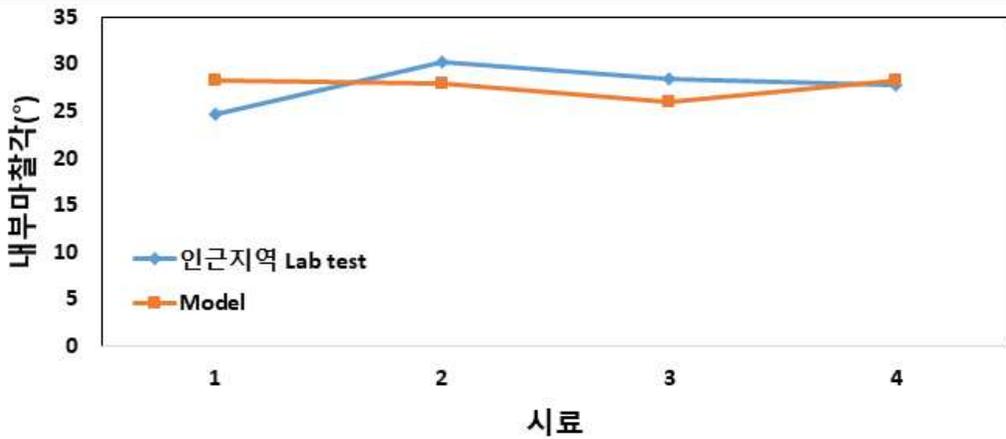
그림 4.7(a)는 모델검증을 위해 산사태가 발생한 인근 편마암 토층으로부터 채취한 토질시료에 대해 직접시험에 의한 내부마찰각과 모델에 의해 산정된 내부마찰각을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 두 가지 방법으로 구한 개별 시료의 내부마찰각이 거의 유사한 경향성을 보임으로써 상관성이 높음을 알 수 있다. 즉, 모델개발을 위해 직접시험에 의한 내부마찰각이 큰 토질시료는 개발된 모델에 의해 산정된 내부마찰각도 크게 나타나고, 직접시험에 의한 내부마찰각이 작은 토질시료는 모델에 의해 산정된 내부마찰각 또한 작게 나타나는 일관성을 보였다. 또한, 기존 선행연구 분석 결과 이문세 등(2008)의 결과와는 편차가 확인되었으며, 황의순(2014)의 결과와는 유사한 경향을 나타내었다.

그림 4.7(b)는 모델검증을 위해 산사태가 발생한 인근 화강암 토층으로부터 채취한 토질시료에 대해 직접시험에 의한 내부마찰각과 모델에 의해 산정된 내부마찰각을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 이 경우 역시 두 가지 방법으로 구한 개별 시료의 내부마찰각이 거의 유사한 경향성을 보임으로써 상관성이 높은 것으로 나타났다. 즉, 모델검증을 위해 직접시험에 의한 내부마찰각이 큰 토질시료는 개발된 모델에 의해 산정된 내부마찰각도 크고, 작은 토질시료는 따라서 작게 나타나는 일관성을 보였다.

이처럼 두가지 경우로 구분하여 본 연구에서 개발한 내부마찰각 산정모델의 유효성을 검증한 결과 대체적으로 높은 상관성을 가지는 것으로 나타남으로써 연구지역과 같은 편마암 지역의 토층지반에서 내부마찰각을 산정하기 위해 본 내부마찰각 산정모델을 적용할 수 있는 것으로 판단된다. 그리고 본 연구에서 제안한 모델을 활용할 경우 직접 전단시험을 수행하지 않고 일부 토질물성만으로도 해당 토층지반에서의 전단강도를 개략적으로 추정하거나 어느 정도 예측이 가능할 것이다.



(a) 산사태 발생 구간 직접전단 실험 결과 및 모델식 검증



(b) 인근지역 산사태 미발생 구간 직접전단 실험 결과 및 모델식 검증  
 그림 4.7 편마암 지역의 직접전단시험에 의한 내부마찰각과 산정모델에 대한 검증

## 제 5 장 산사태 수치해석

### 5.1 침투 및 사면안정 해석

본 연구에서는 사면안정해석은 침투해석의 결과를 연계해석 하여 한계평형해석에서 가장 많이 사용하는 Bishop절편법을 사용하여 안정해석 하였으며, 그림 5.1과 같이 연구지역인 A지역의 우기시 자연사면에서 극한강우 조건을 반영하여 강우 침투를 통한 안정성에 끼치는 영향과 강우침투로 인해서 화강암 토층 내에 토석류 현상의 연관성을 고려하였다.

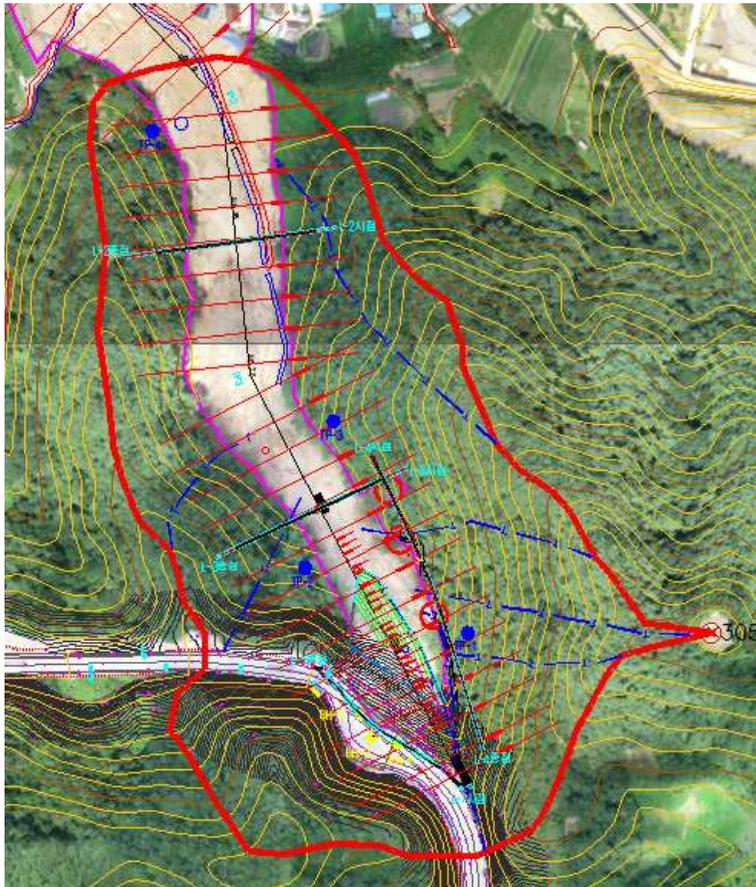


그림 5.1 A지역 산사태 발생 현황

(1) 현장조사를 통한 역학 분석

A지역 산사태 현장조사를 통하여 역학조사를 실시한 결과, 상부 도로하면에 보강 토 블록 및 계단식 옹벽의 붕괴현상을 확인하여 상부의 사면파괴 발생 후 토석류가 발생하였을 가능성, 기존 계단식 옹벽 붕괴 후 토석류가 발생하였을 가능성, 마지막으로 사면 계곡부 전체 가장 약한 부분에서 사면파괴 후 토석류가 발생하였을 가능성이 있는 것으로 분석되었다.

따라서 본 연구에서는 산사태가 발생할 수 있는 시나리오 3가지의 경우를 분석하여 침투해석 수행 후 사면안정해석으로 산사태가 발생할 수 있는 원인을 분석하고자 하였다.

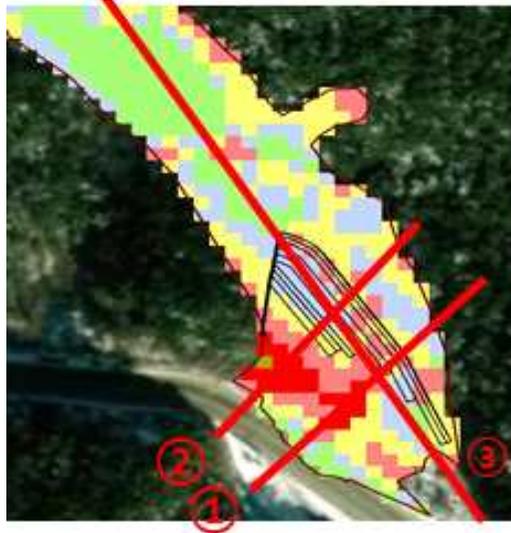


그림 5.2 A지역 산사태 발생 예상 구간 분석

(2) 상부 도로부 사면파괴에 따른 원인분석

A지역의 산사태 발생 시나리오 1은 상부 도로부에서 사면 붕괴가 시작되어 산사태가 발생하였을 가능성을 역추적하여 원인을 분석하였다.

산사태 발생 이전의 지형 및 지층에 대한 정확한 자료를 획득하는 것은 불가능하며 현재 지형 및 과거의 위성사진등을 통해 과거의 지형을 추정하였다. 또한 시추장비의 계곡부 진입이 불가능하여(민원 및 지층 연약화로 장비진입불가) 상부도로의 시추조사와 계곡부의 물리탐사 및 인력 시굴을 통해 토층을 유추한 결과는 다음과 같다.

과거 위성사진 조사결과 그림 5.3(a)와 같이 1996년 이후 선형개량공사(직선화) 시행한 것으로 조사되었으며, 왕복 2차선도로임을 고려하여 도로 폭을 12m로 가정하여 추정하였다.

1996년 이후 선형개량을 위해 계곡부에 대규모 매립을 시행하였으며, 도로폭 약 32m(20m정도 확폭)로 형성하며 계곡부를 매립한 것으로 추정된다. 또한 그림 5.3(b)와 같이 2003년 발생한 수해복구를 위해 계곡 하부에 2004년 계단식 옹벽을 설치한 것으로 검토되었다.

그림 5.3(c)는 산사태 발생 후 지반조사 및 시공사에서 시행한 지반조사결과를 횡단면도에 현지반선과 함께 도시하였고, 녹색선이 산사태 발생 후의 현 지반선이다.



(3) 계단식 옹벽 상부 내지 하부 사면파괴에 따른 원인분석

A지역의 산사태 발생 시나리오 2는 상부 도로부 하면에 있는 계단식 옹벽 상부 내지 계단식 옹벽 하부에서 사면 붕괴가 시작되어 산사태가 발생하였을 가능성을 역추적하여 원인을 분석하였다.

그림 5.4의 계단식 옹벽의 전체적인 지형은 드론측량 및 지형도 분석을 통해 횡단면도를 활용하였다.



그림 5.4 시나리오 2 해석단면 - 계단식 옹벽 상부 내지 하부 사면파괴

(3) 계곡부 전체 활동파괴에 따른 원인분석

A지역의 산사태 발생 시나리오 3은 계곡부를 따라 전체 활동파괴에 따른 산사태가 발생하였을 가능성을 역추적하여 원인을 분석하였다. 따라서 그림 5.5와 같이 드론측량 및 지형도 분석을 통해 종단면도 지형도를 활용하였다.



그림 5.5 시나리오 3 해석단면 - 계곡부 전체 활동파괴

## 5.2 지반조사 결과

### (1) 지반조사 결과

#### 1) 지반조사 위치도

산사태 발생 이전의 지형 및 지층에 대한 정확한 자료를 획득하기 위해서는 산사태가 발생된 구간에서 지반조사를 수행하여야 하나, 시추장비의 계곡부 진입이 불가능하여(민원 및 지층 연약화로 장비 진입불가) 상부도로에서 시추조사 3공과 시험굴(Test pit) 4공을 통해 지반조사 결과를 확인하였다.

그림 5.6은 지반조사 위치도를 나타내었다.

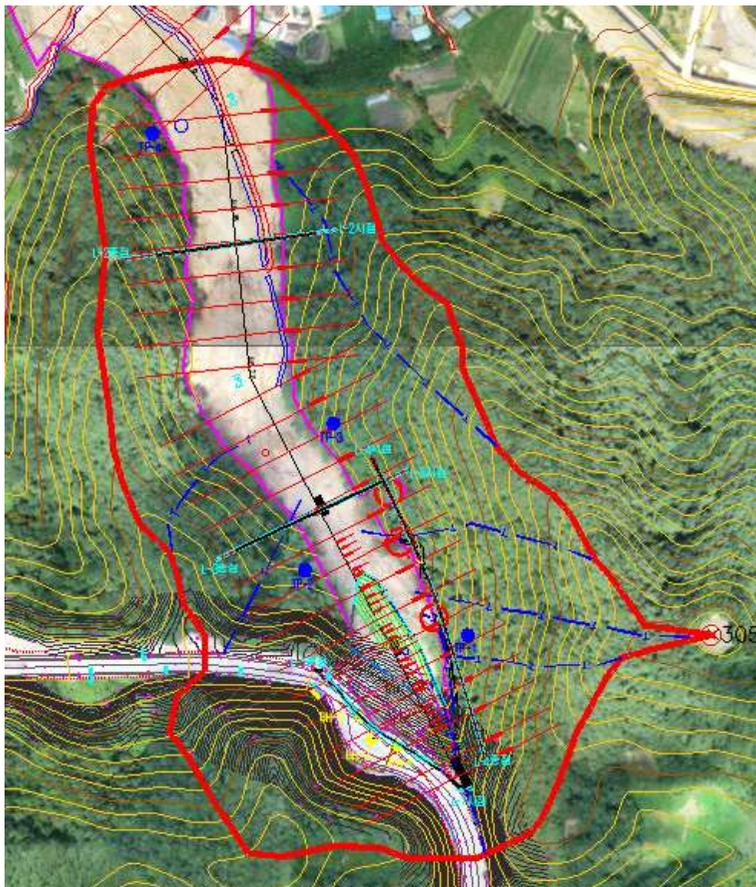


그림 5.6 지반조사 위치도

## 2) 조사 구간의 지층단면도

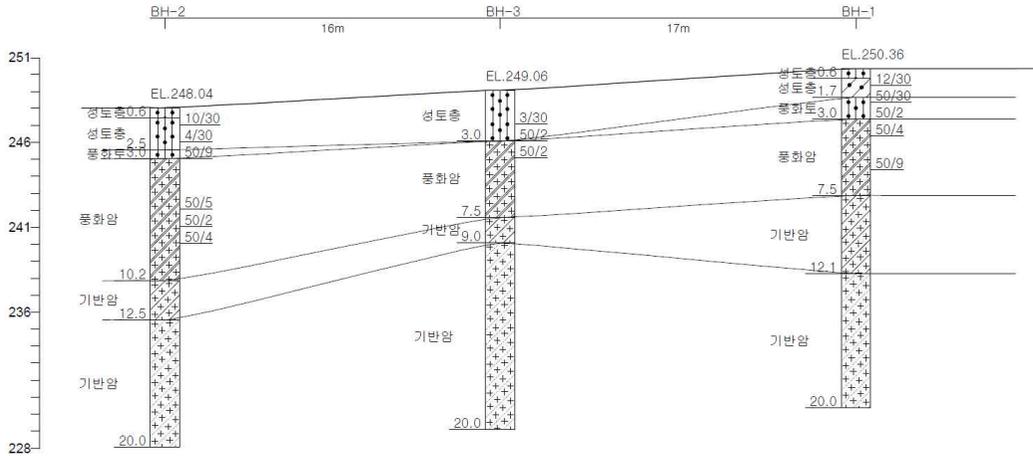
지층단면도 분석결과, 그림 5.7과 같이 대부분 성토층, 풍화토, 풍화암, 기반암으로 나타나고 있으며, 성토층의 경우 자갈섞인 실트 모래, 실트질 모래, 점토질모래로 구분된다. 상대밀도는 매우 느슨 내지 약간조밀한 상태를 나타냈으며, 대부분 암갈색을 띠고 있다.

풍화토층은 성토층 하부 지층으로 BH-1, 2에서 확인되었다. 기반암의 풍화대로 완전풍화되어 모암조각이 잔존하고 있다. 실트질 모래로 구성되어 있으며, 상대밀도는 매우 조밀하다. 대부분 담보라색을 띠고 있다.

풍화암층은 풍화토 하부 지층으로 전역에서 확인되었다. 기반암의 풍화대로 높은 내지 완전풍화 상태를 나타내고 있다. 실트, 모래 및 암편으로 분리 산출되었으며, 색은 암보라색을 띠고 있다.

기반암은 연암과 보통암으로 구분되었으며 전역에서 확인되었다. 연암의 경우 풍화정도는 심한~약한 풍화를 나타내고 있으며, 파쇄정도는 심한~보통 파쇄를 나타내고 있다. 강도는 보통~강한 상태이며, 코어 형상은 암편상~장주상 코어를 확인하였다. 암질상태는 매우 나쁨~나쁜 정도로 나타났다.

보통암의 경우 풍화정도는 중간~약한 풍화로 나타났으며, 파쇄정도는 보통~약간 파쇄로 확인되었다. 강도는 보통~강한 정도이며, 코어는 단주상~장주상의 코어를 확인하였다. 암질상태는 나쁨~대체로 좋은 상태로 나타났다.



법례	기반암	성토층	풍화암
	기반암	성토층	풍화토

그림 5.7 지층단면도

(2) 전기비저항 탐사결과

1) 탐사축선의 전개

전극의 간격은 사면의 길이와 폭을 고려하여 5.0m로 하였으며 탐사를 위해 전개된 탐사축선의 제원은 표 5.1과 같다.

표 5.1 탐사축선 전개

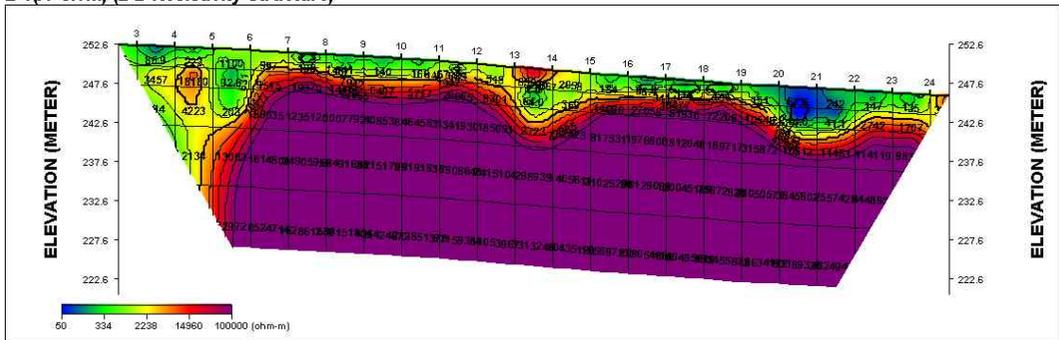
위치	Line No.	Distance (m)	전극수	전극간격 (m)	탐사심도 (m)	비고
곡성 오산면	Line-1	125m	26	5.0m	G.L -25.0m	
	Line-2	135m	28	5.0m	G.L -25.0m	
	Line-3	135m	28	5.0m	G.L -25.0m	
	Line-4	195m	40	5.0m	G.L -25.0m	

2) 탐사 결과

① Line-1

Line-1의 해석결과, 그림 5.8과 같이 전기비저항탐사의 비저항값은 측정점 주변에 비해 저항치의 변화를 상대적으로 보여주는 값으로 공학적인 특성을 보이는 절대적인 수치가 아니다. Line-1에서는 측정점 5~6, 13~14, 20~22를 비저항 이상대로 판단할 수 있으며, 시점측의 이상대 측정점 5~6는 계곡의 영향으로 판단된다. 측정점 13~14는 붕괴부 절벽의 시점이고 20~22는 붕괴부의 종점부로 매질의 차이에 따른 비저항 이상대로 판단된다. 특히 시점부근에 불연속면이 발달되어 있을 것으로 판단된다.

L-1(A=5.0M) (2-D Resistivity Structure)



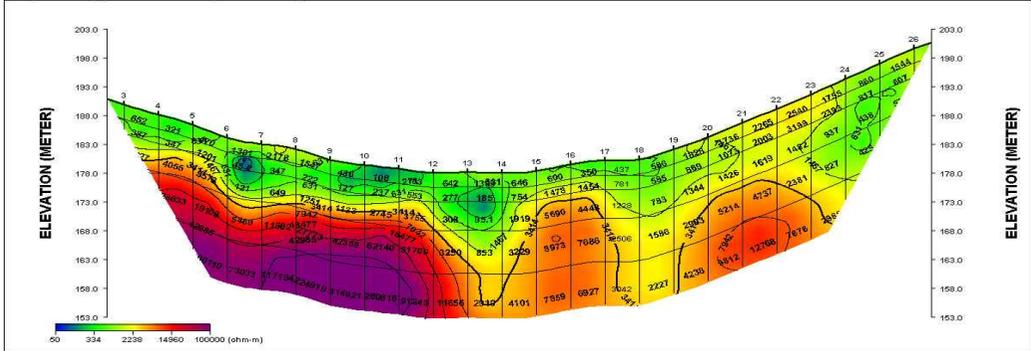
- 고비저항대 (적 · 황색부) : 1000 Ω·m 이상
- 중비저항대 (녹색부) : 300 ~ 1000 Ω·m
- 저비저항대 (청색부) : 300 Ω·m 이하

그림 5.8 탐사결과 해석단면 Line-1

② Line-2

Line-2의 해석결과, 그림 5.9와 같이 이상 저비저항대는 측정점 6~7, 9~11, 13~14 구간으로 지하수의 흐름이 발생하는 구간으로 판단된다. 특히 측정점 9~11은 산사태 발생전 유로의 위치이며, 측정점 13~14와 18~19구간은 동서측 지맥을 불연속면으로 절단하는 면으로 13~14구간은 현재 지표에 유로가 형성되어 있다.

L-2(A=5.0M) (2-D Resistivity Structure)



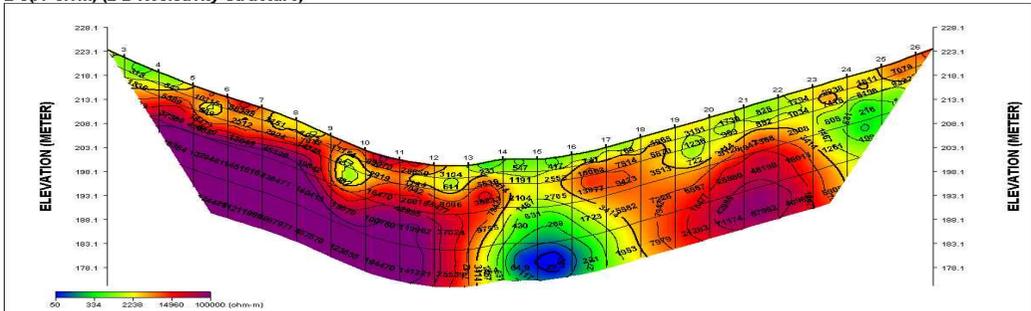
- 고비저항대 (적 · 황색부) : 1000  $\Omega \cdot m$  이상
- 중비저항대 (녹색부) : 300 ~ 1000  $\Omega \cdot m$
- 저비저항대 (청색부) : 300  $\Omega \cdot m$  이하

그림 5.9 탐사결과 해석단면 Line-2

③ Line-3

Line-3의 해석결과, 그림 5.10과 같이 이상 비저항대인 측점 14~16의 하부에 동서측지맥을 분리하는 불연속면을 따라 발달된 지하수의 유로가 형성되어 있을 것으로 판단된다.

L-3(A=5.0M) (2-D Resistivity Structure)



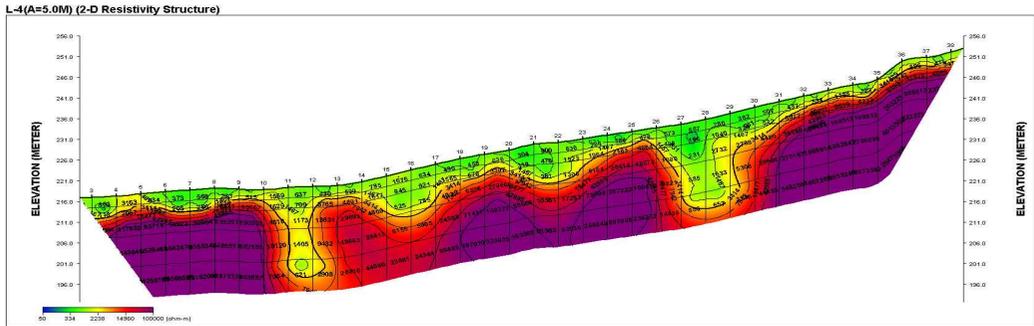
- 고비저항대 (적 · 황색부) : 1000  $\Omega \cdot m$  이상
- 중비저항대 (녹색부) : 300 ~ 1000  $\Omega \cdot m$
- 저비저항대 (청색부) : 300  $\Omega \cdot m$  이하

그림 5.10 탐사결과 해석단면 Line-3

④ Line-4

Line-4의 해석결과, 그림 5.11과 같이 Line-4는 동측비탈면을 따라 측정된 측선으로 이상대 비저항대인 측점 6~7은 소규모 산사태 발생지역이며, 11~12와 27~28

구간의 저비저항대인 이상대는 동측비탈면에서 불연속면을 따라 발달된 유로의 위치로 추정된다.



- 고비저항대(적·황색부) : 1000  $\Omega \cdot m$  이상
- 중비저항대(녹색부) : 300 ~ 1000  $\Omega \cdot m$
- 저비저항대(청색부) : 300  $\Omega \cdot m$  이하

그림 5.11 탐사결과 해석단면 Line-4

### 3) 전기비저항탐사 요약

종합결과 L-1의 시점, L-2의 13~14와 18~19구간, L-3의 14~16으로 발달된 N-S방향의 계곡을 따라 형성된 동서측의 지맥을 분리하는 불연속면이 발달되어 지하수의 유로가 형성되어 있고, L-4라인의 11~12와 27~28의 소규모 불연속면이 동측지맥에서 계곡(E-W)으로 발달되어 계곡으로 집수되는 지하수의 흐름이 있을 것으로 분석된다.

(3) 지반물성

해석상의 지반의 물성치 산정은 실내 실험을 통한 결과를 적용하였으며, 그 중 지반정수는 표 5.2와 같이 국내 화강풍화토의 불포화지반 강도정수로 선정하였다. 비탈면의 안정에 가장 큰 영향을 미치는 토질은 화강암 상부 토층인 붕적토로 판단된다.

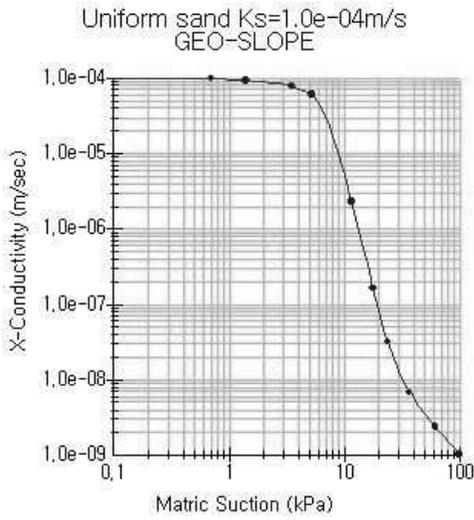
산사태 발생당시의 전단강도정수는 역해석을 통해 예측할수도 있으나, 여러 단면에 대해 해석을 실시해야 하는 경우 동일지반에 대한 파괴시 전단강도가 상이해지는 문제가 있다. 따라서 보강토 옹벽 설계시 사용되었던 설계지반 정수와 현장 지반조사를 통한 투수계수를 분석하여 타당성을 확보한 후 사용하였다.

**표 5.2 해석에 사용된 지반정수**

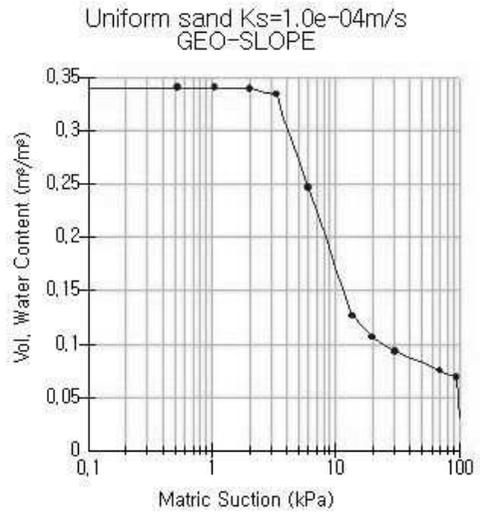
구분	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	점착력 (kN/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 (°)	투수계수 (cm/sec)
성토재	19	15	25	4.84x10 <sup>-3</sup>
붕적토	18	5	25	3.88x10 <sup>-3</sup>
풍화토	19	10	20	9.75x10 <sup>-3</sup>
풍화암	20	50	30	1.81x10 <sup>-3</sup>
연암	25	120	35	4.15x10 <sup>-5</sup>

(4) 함수특성곡선 및 불투수계수곡선

함수특성곡선과 불포화 투수계수곡선은 불포화 지반의 특성이며, 매우 중요한 물성이라 할 수 있다. 본 연구에 사용된 함수특성곡선과 불투수계수곡선은 Green and Corey 기본이론방정식이 적용된 기존 연구 문헌을 참고하여 선정하였으며, 기반암의 경우는 불투수층으로 가정하여 선정하였다. 본 연구에 적용된 함수특수곡선과 불투수계수곡선은 그림 5.12와 같다.



(a) 불포화 투수계수 곡선



(b) 함수특성 곡선

그림 5.12 침투해석에 사용된 함수특성곡선과 불포화 투수계수 곡선

## 5.3 산사태 시나리오별 수치해석 결과

### 5.3.1 침투해석 결과

강우의 재현빈도는 지속시간 및 강우강도에 영향을 미치며, 재현빈도가 높을수록 강우강도가 높고, 동일한 재현빈도 내에서는 강우강도가 높을수록 지속시간이 짧다. 따라서 합리적인 지속시간 및 강우강도의 선정은 중요한 요소이다.

본 연구에서는 산사태가 발생하기 전 30일 동안의 실제 강우와 일상에 자주 발생되는 강우 10 mm/hr, 산사태를 유발할 가능성이 큰 집중호우(30 mm/hr, 50 mm/hr)에 해당하는 강우강도를 선정했다.

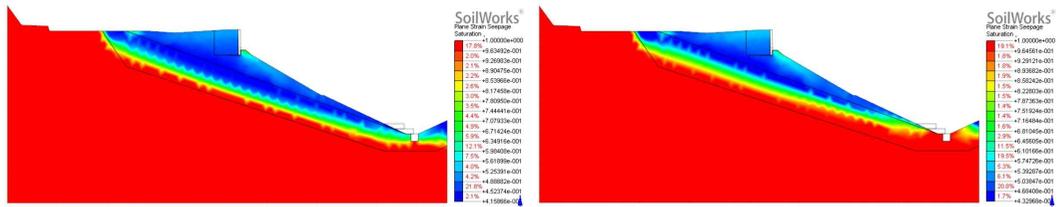
강우 침투로 인한 불포화 사면은 지반에서 초기 모관흡수력 분포에 큰 영향을 준다. 지형 특성, 지반, 기후, 식생 등으로 인해서 지반의 모관흡수력은 변화를 가져온다. 사면에서 오랜 건기는 지반의 수분이 증발을 일으켜 지반의 모관흡수력은 증가하게 된다. 이렇게 높은 모관흡수력이 분포된 상태인 사면에 강우가 올 경우 지반의 투수성은 급격히 떨어져 있는 상태이기 때문에 사면 내로 침투가 잘 발생하지 않는다. 그러나 선행강우로 인해 사면 표층에 충분한 수분이 있으면 모관흡수력이 작아져 우기시 지반의 투수성이 커져 강우가 쉽게 지반 내 침투할 수 있다. 이런 현상을 반영하기 위해서 지반의 초기 모관흡수력 조건 등을 충분히 조사해야 한다. 강우에 따른 지반 모관흡수력 분포 변화에 대한 연구를 살펴보면 우리나라에서 강우가 집중되는 8월 ~ 9월 사이에 1.2 m 깊이에서 대략 10 ~ 30 kPa 범위의 모관흡수력이 분포하고 있다(이인모 등, 2002).

본 침투해석에서는 강우침투 효과를 높이기 위해 본격적인 강우 이전에 약한 선행강우가 온 경우를 고려하여 지반의 초기 모관흡수력 분포를 최대 20kPa 범위로 적용하였다. 침투해석은 MIDAS사의 Soilworks 프로그램을 이용하였으며, 총 48시간으로 10단계로 나누어 해석하여 각 연구지역에 적용하였다.

#### (1) 시나리오 1 침투해석 - 상부 도로부 사면과괴

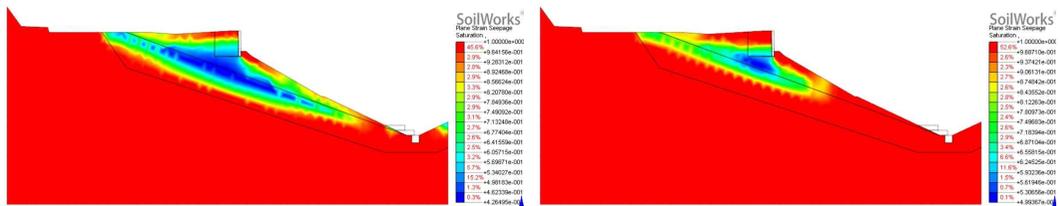
그림 5.13는 시나리오 1 지역에 침투해석 결과로서 10단계 중 2단계(86,400sec, 172,800sec)를 선정하여 다음과 같이 나타냈으며, 강우에 의해 습윤영역이 형성 및 확대되는 현상을 그림에서 볼 수 있었다.

초기 지하수는 암과 토층의 경계면이며, 시간당 강우량이 10mm/hr의 경우와 산사태가 발생하기 전 30일 동안의 실제강우의 경우 지하수위가 상승하기까지는 지표면에서 침투수량이 작고 사면경사에 의하여 자연배수가 되므로 침투가 되지 못하였다. 시간당 강우량이 30mm/hr 이상부터 지표면에서 침투가되어 지하수위가 상승하는 것을 확인하였으며, 50mm/hr에선 더 심한 포화형상으로 나타났다.



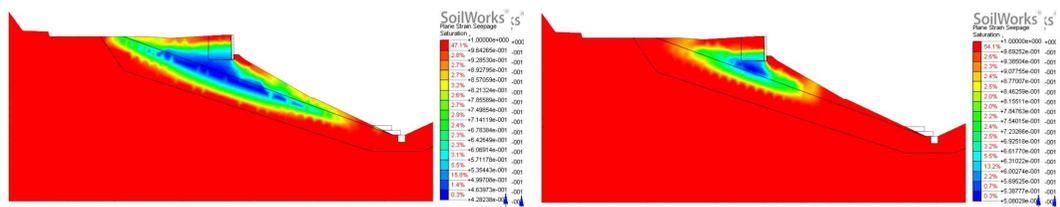
(a) 10mm/hr, 86,400sec

(b) 10mm/hr, 172,800sec



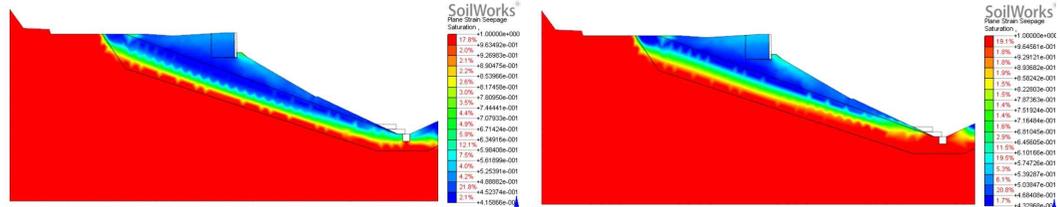
(c) 30mm/hr, 86,400sec

(d) 30mm/hr, 172,800sec



(e) 50mm/hr, 86,400sec

(f) 50mm/hr, 172,800sec



(g) 실제강우, 86,400sec

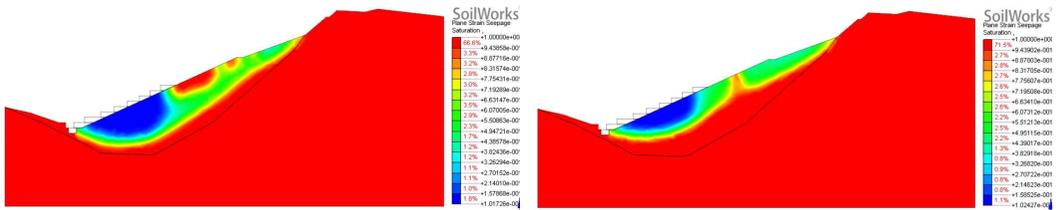
(h) 실제강우, 172,800sec

그림 5.13 A지역 산사태 시나리오 1 강우별 시간에 따른 침투해석

(2) 시나리오 2 침투해석 - 계단식 옹벽 상부 내지 하부 사면 파괴

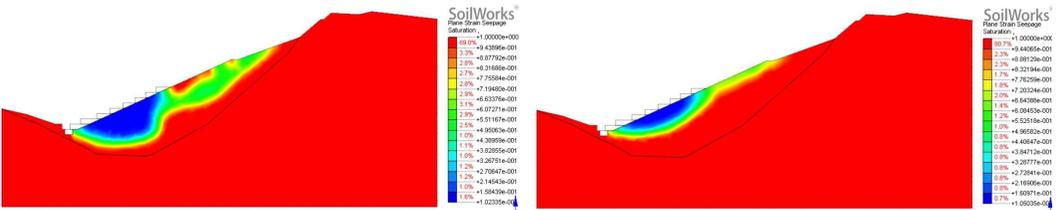
그림 5.14는 시나리오 2 지역에 침투해석 결과로서 10단계 중 2단계(86,400sec, 172,800sec)를 선정하여 다음과 같이 나타냈으며, 강우에 의해 습윤영역이 형성 및 확대되는 현상을 그림에서 볼 수 있었다.

그림 5.13과 같이 초기 지하수는 암과 토층의 경계면이며, 시간당 강우량이 10mm/hr의 경우와 산사태가 발생하기 전 30일 동안의 실제강우의 경우 지하수위가 상승하기까지는 지표면에서 침투수량이 작고 사면경사에 의하여 자연배수가 되므로 침투가 되지 못하였다. 시간당 강우량이 30mm/hr 이상부터 지표면에서 침투가되어 지하수위가 상승하는 것을 확인하였으며, 50mm/hr에선 더 심한 포화형상으로 나타났다.



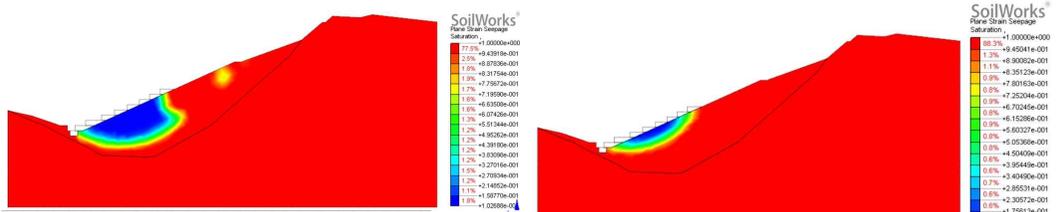
(a) 10mm/hr, 86,400sec

(b) 10mm/hr, 172,800sec



(c) 30mm/hr, 86,400sec

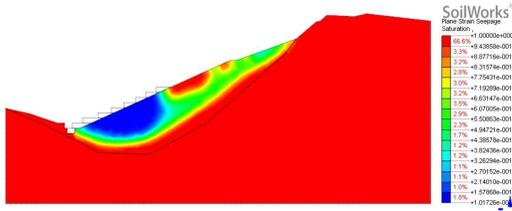
(d) 30mm/hr, 172,800sec



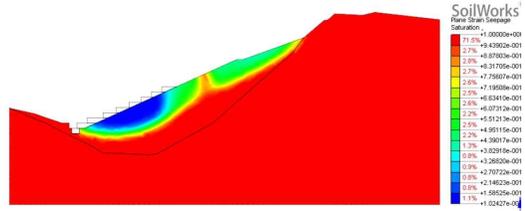
(e) 50mm/hr, 86,400sec

(f) 50mm/hr, 172,800sec

그림 5.14 A지역 산사태 시나리오 2 강우별 시간에 따른 침투해석(계속)



(g) 실제강우, 86,400sec



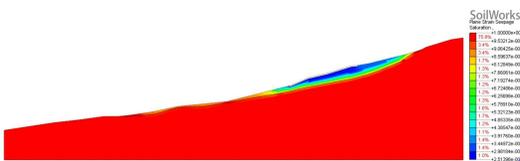
(h) 실제강우, 172,800sec

그림 5.14 A지역 산사태 시나리오 2 강우별 시간에 따른 침투해석

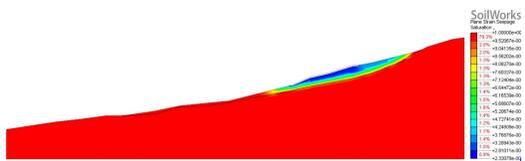
(3) 시나리오 3 침투해석 - 계곡부 전체 활동과괴

그림 5.15는 시나리오 3 지역에 침투해석 결과로서 10단계 중 2단계(86,400sec, 172,800sec)를 선정하여 다음과 같이 나타냈으며, 강우에 의해 습윤영역이 형성 및 확대되는 현상을 그림에서 볼 수 있었다.

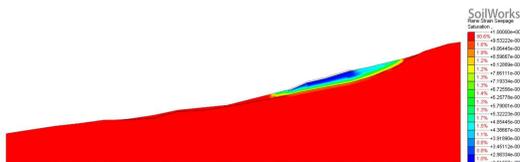
그림 5.13과 같이 초기 지하수는 암과 토층의 경계면이며, 시간당 강우량이 10mm/hr의 경우와 산사태가 발생하기 전 30일 동안의 실제강우의 경우 지하수위가 상승하기까지는 지표면에서 침투수량이 작고 사면경사에 의하여 자연배수가 되므로 침투가 되지 못하였다. 시간당 강우량이 30mm/hr 이상부터 지표면에서 침투가 되어 지하수위가 상승하는 것을 확인하였으며, 50mm/hr와 큰 차이가 나타나지 않아 30mm/hr 이상의 강우강도시 위험성을 확인하였다. 또한 종단면도 상에서 상부 계단식 옹벽이 있는 곳은 옹벽이 불투수이기 때문에 계단식 옹벽 하부에 포화가 이루어지지 않는 것을 확인하였다.



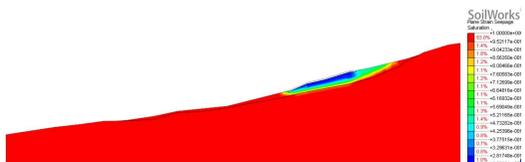
(a) 10mm/hr, 86,400sec



(b) 10mm/hr, 172,800sec

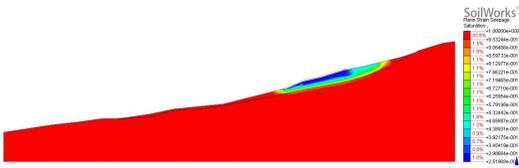


(c) 30mm/hr, 86,400sec

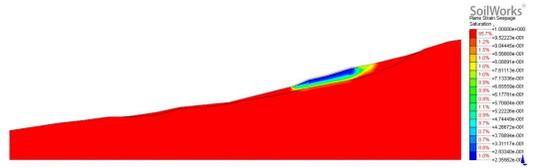


(d) 30mm/hr, 172,800sec

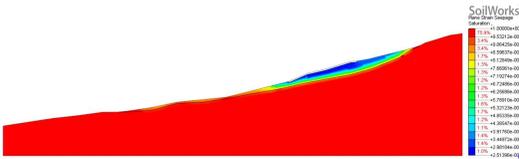
그림 5.15 A지역 산사태 시나리오 3 강우별 시간에 따른 침투해석(계속)



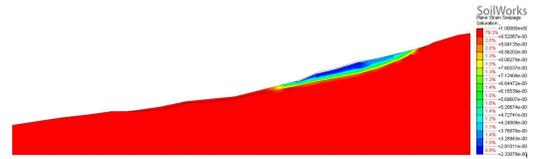
(e) 50mm/hr, 86,400sec



(f) 50mm/hr, 172,800sec



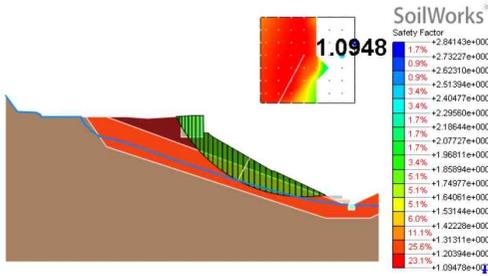
(g) 실제강우, 86,400sec



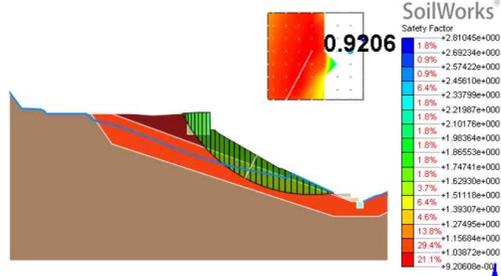
(h) 실제강우, 172,800sec

그림 5.15 A지역 산사태 시나리오 3 강우별 시간에 따른 침투해석

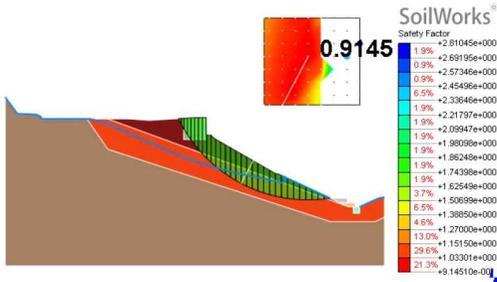




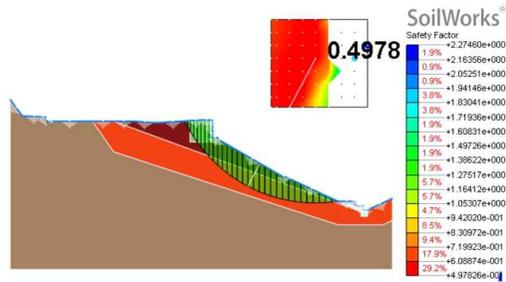
(c) 10mm/hr, FS = 1.095



(d) 30mm/hr, FS = 0.921



(e) 50mm/hr, FS = 0.915



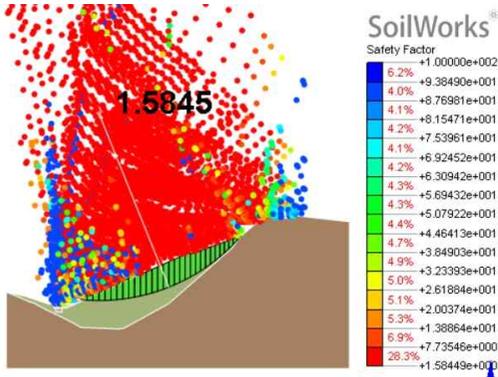
(f) 지표면 포화, FS = 0.498

그림 5.16 A지역 산사태 시나리오 1 강우별 시간에 따른 사면안정해석

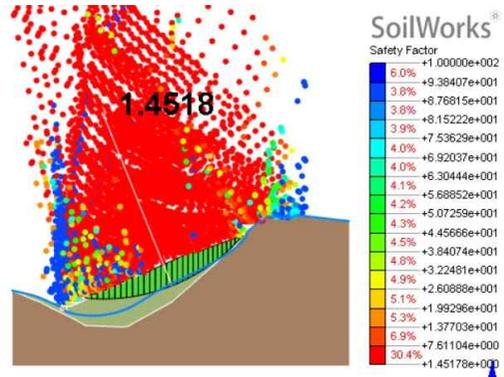
(2) 시나리오 2 사면안정해석 - 계단식 옹벽 상부 내지 하부 사면파괴

A지역 산사태 시나리오 2의 경우 그림 5.17과 같이 건기시의 경우 1.585로 안전한 상태이며, 실제강우 및 10mm/hr일때의 습윤영역에 포화도가 적게 있으며, 30mm/hr에서 포화도가 확대되었고 이때의 안전율은 각각 1.452, 1.559, 1.398이다. 50mm/hr에 더 심한 포화형상으로 나타났으며, 완전포화상태일 경우 안전율은 각각 1.166, 0.849로 나타났다.

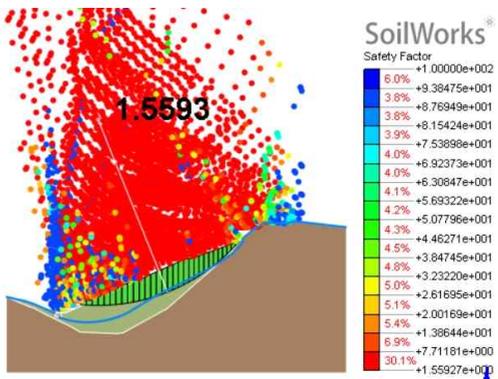
실제강우시 계단식 옹벽 하부는 불포화로 침투해석 결과를 나타내었으나 실제 거동은 계단식 옹벽의 노후에 따른 틈새로 우수가 침투하여 계단식 옹벽 하부 지표면까지 포화대가 상승하여 전구간 포화상태에 따른 붕괴로 예상된다. 따라서 산사태를 유발할 가능성이 큰 집중호우(50mm/hr)의 경우 사면이 붕괴가 가능한 안전율 1.0과 가깝게 나타났으며, 장시간의 강우로 인해 지표면이 포화될 경우 안전율은 1보다 낮은 0.849로 사면의 붕괴로 인한 산사태 발생이 예상되는 것으로 확인하였다.



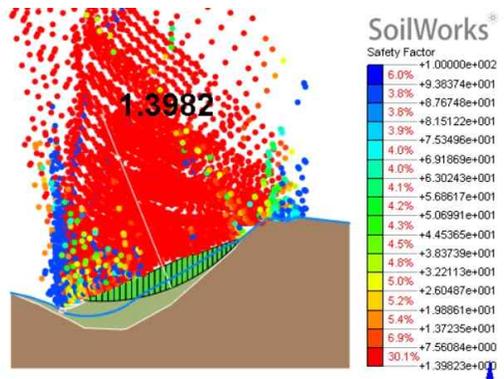
(a) 건기시, FS = 1.585



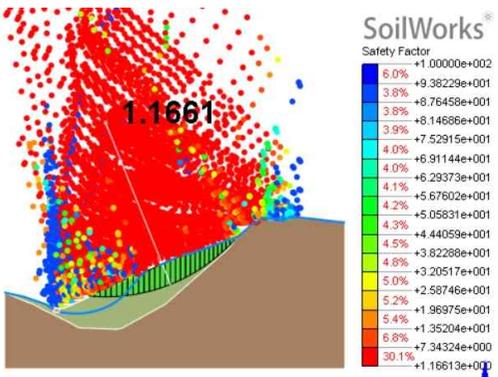
(b) 실제 강우시, FS = 1.452



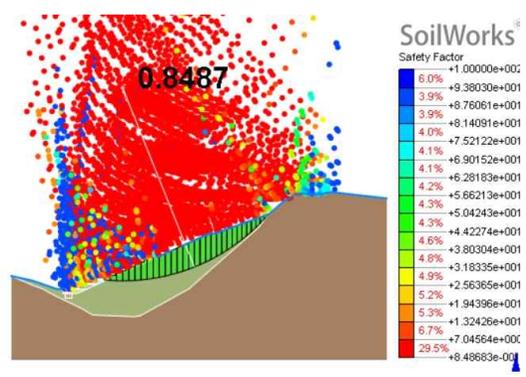
(c) 10mm/hr, FS = 1.559



(d) 30mm/hr, FS = 1.398



(e) 50mm/hr, FS = 1.166



(f) 지표면 포화, FS = 0.849

그림 5.17 A지역 산사태 시나리오 2 강우별 시간에 따른 사면안정해석

(3) 시나리오 3 사면안정해석 - 계곡부 전체 활동과피

A지역 산사태 시나리오 3의 경우 그림 5.18과 같이 같이 건기시의 경우 1.692로 안전한 상태이며, 실제강우 및 10mm/hr일때의 습윤영역에 포화도가 적게 있으며, 30mm/hr에서 포화도가 확대되었고 이때의 안전율은 각각 1.312, 1.619, 1.197이다. 50mm/hr에 더 심한 포화형상으로 나타났으며, 완전포화상태일 경우 안전율은 각각 1.164, 0.926로 나타났다.

계곡부 전체가 포화되지 않고 실제강우시 계단식 옹벽 하부는 불포화로 침투해석 결과를 나타내었다. 그러나 실제 거동은 계단식 옹벽의 노후에 따른 틈새로 우수가 침투하여 계단식 옹벽 하부 지표면까지 포화대가 상승하여 전구간 포화상태에 따른 붕괴로 예상된다. 따라서 산사태를 유발할 가능성이 큰 집중호우(30mm/hr, 50mm/hr)의 경우 사면이 붕괴가 가능한 안전율 1.0과 가깝게 나타났으며, 대부분 계단식 옹벽 하부에서 파괴가 발생하는 것을 확인하였다. 또한, 장시간의 강우로 인해 지표면이 포화될 경우 안전율은 1보다 낮은 0.926로 사면의 붕괴로 인한 산사태 발생이 예상되는 것으로 확인하였다.

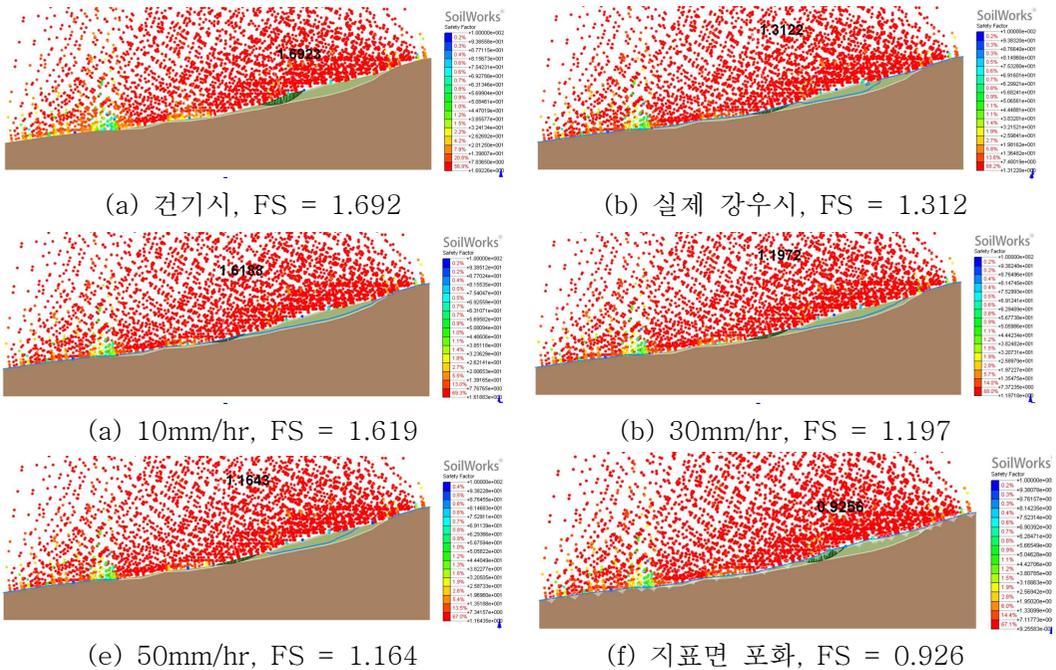


그림 5.18 A지역 산사태 시나리오 3 강우별 시간에 따른 사면안정해석

자연사면에서의 기준 안전율은 우기시(침투해석) 1.30 이상, 우기시(지표면 포화) 1.20 이상 일수록 사면은 안정하다. 강우강도가 낮을 경우 안전율은 침투해석시 자연사면에서의 안전율 1.3 대비 시나리오 1, 3에서 기준안전율에 미치지 못하는 결과가 확인되었으나 시나리오 2에서는 안전한 것으로 분석되었다. 이는 계단식 옹벽이 불투수층으로 계단식 옹벽 하부 지층은 포화가 되지 않는 것으로 침투해석이 수행되었으나, 실제 거동은 공용중 균열 등으로 인해 틈새로 우수가 침투되어 계단식 옹벽 하부 지층까지 포화된 것으로 분석되었다.

따라서 전구간 지표면 포화시의 경우 자연사면에서의 안전율 1.0 대비 낮은 안전율을 보여 큰 강우가 발생 시 산사태 및 사면파괴가 발생할 수 있는 것으로 분석되었다.

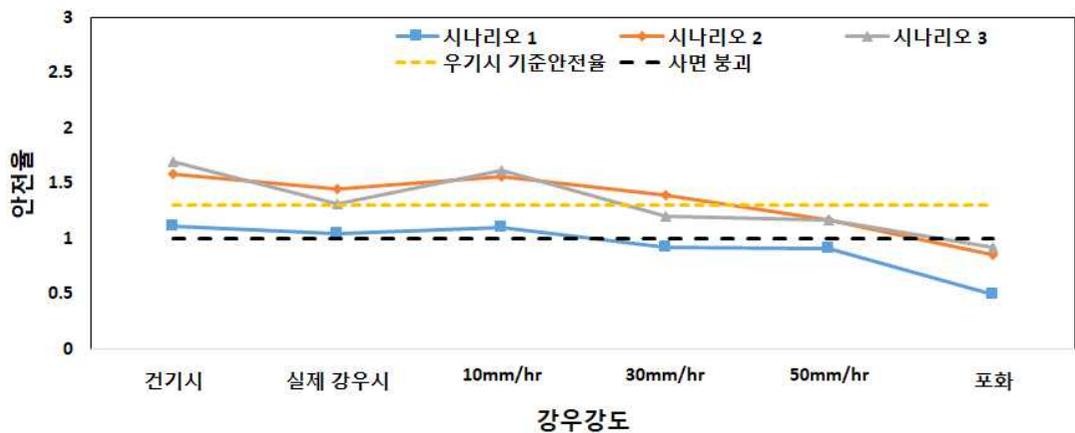


그림 5.19 강우강도에 따른 안전율

표 5.3 강우강도에 따른 안전율

구분	건기시	실제 강우시	10mm/hr	30mm/hr	50mm/hr	지표면 포화
시나리오 1	1.108	1.039	1.095	0.921	0.915	0.498
시나리오 2	1.585	1.452	1.559	1.398	1.166	0.849
시나리오 3	1.692	1.312	1.619	1.197	1.164	0.926

## 제 6 장 결 론

본 연구에서는 그동안 검토되지 않았던 호남권 지역에서 주요 산사태자료를 토대로 하여 산사태와 관련된 제반 특징을 파악하였고, 지질별로 구분하여 산사태와 관련된 토질특성을 정확하게 분석함으로써 지반공학적인 관점에서 자연사면에서 발생되었던 호남권 대규모 산사태를 체계적으로 정리하였다. 그리고 자연사면의 토층에서 산사태에 유의한 영향인자로 간주되는 전단강도를 쉽고 간편하게 산정할 수 있는 모델을 개발하였다.

본 연구에서 얻은 결과는 크게 4가지로 요약된다. 첫째는 호남권지역에서 발생되었던 주요 산사태들의 제반 특징을 파악하였으며, 둘째는 지반공학적인 관점에서 지질별 산사태들의 체계적인 정리하였다. 셋째는 토질물성만으로 산사태에 유의한 토질정수를 간편하게 산정할 수 있는 모델을 개발하였으며, 마지막으로 산사태 발생 요인 중 가장 큰 영향을 미치는 강우강도를 이용하여 산사태가 발생할 수 있는 과정을 역추적함으로써 그에 대한 침투해석 및 안정성해석을 평가하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 산사태는 토층의 지반물성과 관계되며 산사태 발생지역은 대체로 큰 간극률과 작은 흙의 단위중량 특성을 갖는데, 화강암 토층은 편마암 토층에 비해 간극률이 작고 흙의 단위중량이 크게 나타나 편마암 토층이 산사태에 더 취약한 것으로 분석되었다. 또한, 화강암 토층은 점착력이 낮으나 내부마찰각은 큰 편으로 분석되었으며, 편마암 토층은 점착력이 높고 내부마찰각이 낮게 나타났다. 다짐도는 화강암 토층이 편마암 토층에 비해 조밀한 지반으로 분석되었다.
2. 통계기법으로 지반정수와 상관성을 분석한 결과 전단강도 중 점착력은 세립토 함유율과 균등계수와 유의한 상관성을 가지며, 내부마찰각은 간극비, 간극률, 습윤단위중량, 포화단위중량, 건조단위중량과 유의한 상관성을 가지는 것으로 분석되었다.
3. 화강암, 편마암 토층으로 구분하여 지반정수와 유의한 상관성을 가지는 물성자료만으로 산사태지역에서 중요하게 고려되는 전단강도를 쉽고 간편하게 산정

할 수 있는 모델 즉, 점착력 산정모델 및 내부마찰각 산정모델을 개발하였다. 그러나 한정된 조건의 통계분석으로 호남권 산사태 자료의 기초자료로 활용될 수 있으며, 추후 호남권 내 산사태 자료를 추가하여 수정 및 보완함으로 모델의 신뢰도와 정확도를 향상시켜야 할 것으로 판단된다.

4. 사면안정 및 침투해석 결과 실제 강우량, 10mm/hr 및 산사태를 유발할 가능성이 큰 극한 강우(30mm/hr, 50mm/hr)에 해당하는 강우강도를 적용된 결과로 강우강도가 클수록 침윤선의 형성 및 확대 현상이 나타났으며, 사면의 안전율은 전단강도 저하로 인해 감소하여 사면이 불안정해지는 것을 알 수 있었다. 특히, 지표면 포화상태의 경우 사면파괴가 발생할 수 있는 안전율 1보다 낮게 나타났다.
5. 국내의 산사태 취약성도 작성을 위해 산사태 유발인자로서의 고려되지 않았던 지반정수와 지층의 조건을 데이터베이스화한다면 산사태 예·경보에 도움이 될 것이며, 사면의 피해 예상지역 선정을 위한 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 곽락호(2019), “사면붕괴 원인분석 및 방지 대책에 관한 연구”, 서울시립대학교 석사학위논문, p.7.
2. 권경득, 손진현, 유성호, 이모영(2004), “사회과학 통계분석과 SPSS 활용”, 아시아미디어 리서치, pp.12~46.
3. 김경수(2005), “국내 자연사면 산사태의 조사 및 해석 기법”, 안동대학교 박사학위논문, p.321.
4. 김경수, 이춘오, 조용찬, 채병곤, 김원영, 송영석, 최영섭, 최정찬(2004), “대도시 사면 통합관리시스템 구축(부산지역)”, KR-04(연차)-09, p.207.
5. 김경수, 김원영, 채병곤, 조용찬(2000), “강우에 의한 산사태의 지질공학적 특성 -충청북도 보은지역-”, 대한지질공학회지, 제 10권, 2호, pp.163~174.
6. 김상익, 서한손, 안병진, 여성칠, 이석구(2000), “미니탭을 이용한 통계학의 이해와 응용”, 민영사, pp.68~72.
7. 김석우, 전근우, 김진학, 김민식, 김민석(2012), “우리나라에 있어서 강우와 산사태 발생간의 관계”, 산림과학공동학술대회, p.1~11.
8. 김성진, 오세봉, 오영근, 신호성(2022), “불포화 지반에서의 산사태 3차원 안정 해석에 대한 사례연구”, 대한토목학회, 제 42권 3호, pp.359~369.
9. 김원영, 이사로, 김경수, 채병곤(1998), “지형 특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성 -연천~철원지역을 대상으로-”, 대한지질공학회지, 제 8권, 2호, pp.115~130.
10. 김원영, 채병곤, 김경수, 기원서, 조용찬, 최영섭, 이사로, 이봉주(2000), “산사태 예측 및 방지기술연구”, 한국자원연구소, KR-00-(T)-09, p.642.
11. 김원영, 채병곤, 김경수, 조용찬, 최영섭, 이춘오, 이철우, 김구영, 김정환, 김준모(2003), “산사태 예측 및 방지기술연구”, 과학기술부, KR-03-(T)-03, p.339.
12. 김원영, 채병곤, 조용찬, 김경수, 이춘오, 최영섭, 김복철, 차두송, 박동선(2004), “산사태위험도 산정시스템 구축 및 피해저감 기술 개발”, 과학기술부, M1-0324-00-0003-03-B31-00-001-00, p.288.
13. 김훈, 신호성, 김윤태, 박덕근, 민덕기(2012), “강우침투실험을 통한 불포화 풍

- 화토 지반의 강우 침투속도 분석”, 한국지반공학회논문집, 제 28권, 2호, pp.71~78.
14. 남동호, 이석호, 김만일, 김병식(2018), “토석류 발생 예측을 위한 강우경보지수 산정”, 대한지질공학회, 제 28권, 1호, pp.47~59.
  15. 박혁진, 이정현(2022), “물리사면모델을 활용한 정량적 산사태 취약성 분석기법 리뷰”, 대한지질공학회, 제 32권, 1호, pp.27~40.
  16. 산림청(2018), “2018년도 전국 산사태방지 종합대책”, p.9.
  17. 산림청(2021), “2021년 전국 산사태예방 종합대책”, p.1~40.
  18. 양승영과 강필중(1987), “야외 지질학”, 형설출판사, p.530.
  19. 오세봉, 문종호, 김태경, 김윤기(2008), “불포화 지반특성 영향에 대한 강우시 사면붕괴의 사례연구”, 대한토목학회논문집, 제 28권, 3호, pp.167~179.
  20. 윤찬영, 전경재, 김경석, 김기홍, 이승우(2010), “DB구축을 통한 강원지역 사면재해 유발강우특성 분석”, 한국지반공학회논문집, 제 26권, 10호, pp.27~38.
  21. 이문세, 류제천, 김경수(2009), “흙의 전단강도 산정을 위한 선형회귀분석모델 개발”, 지질공학논문집, 제 19권, 2호, pp.89~98.
  22. 이문세, 류제천, 임희대, 박주환, 김경수(2008), “단순회귀분석에 의한 토층의 투수계수 산정 모델 제안”, 지질공학논문집, 제 18권, 1호, pp.27~36.
  23. 이사로(1999), “지리정보시스템(GIS)을 이용한 산사태 취약성 분석기법 개발 및 적용 연구”, 연세대학교 박사학위논문, p.163.
  24. 이사로, 이명진, 원중선(2005), “인공신경망을 이용한 강릉지역 산사태 취약성 분석 및 검증”, 자원환경지질, 제 38권, pp.33~43.
  25. 이아연, 김형래, 박혁진, 김순태(2021), “로지스틱 회귀와 인공신경망을 이용한 상주 지역 산사태 취약성 분석”, 대한지질학회, 제 2021권, 10호, p.386.
  26. 이지성(2012), “선행강우를 고려한 인제지역 불포화 화강풍화토 사면의 안정성 특성”, 한국방재학회논문집, 제 12권, 4호, pp. 85~92.
  27. 이지성(2018), “위험수준별 강우를 고려한 산사태 민감도 및 취약성 평가 기법 개발” 부경대학교 박사학위논문, pp.31~33.
  28. 조용찬(2006), “화강암지역 산사태의 특성과 예측 -강원지역을 중심으로-”, 경북대학교 박사학위논문, p.152.
  29. 채병곤, 김원영, 이춘오, 김경수, 조용찬, 송영석(2005), “지질조건에 따른 사태

- 물질이동특성 고찰”, 지질공학회논문집, 제 15권, 2호, pp.185~199.
30. 최경(1986), “한국의 산사태 발생 요인과 예지에 관한 연구”, 강원대학교 박사학위논문, p.45.
  31. 최재형(2008) “선행강우특성에 따른 불포화 풍화토사면의 안정성분석”, 연세대학교 석사학위논문, p.25.
  32. 홍원표, 김운일, 김상규, 한중근, 김마리아(1990), “강우로 기인되는 우리나라 사면활동의 예측”, 대한토질공학회지, 제 6권, 2호, pp.159~167.
  33. 홍원표와 송영석(2002), “우리나라에서의 사면안정 대책공법 적용 사례 연구”, 사면안정 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.1~28.
  34. 황의순(2014), “통계기법을 이용한 산사태지역의 토질특성 분석”, 중부대학교 박사학위논문, pp.1~149.
  35. Baeza, C. and Corominas, J.(1996), “Assessment of Shallow Landslide Susceptibility by Means of Statistical Techniques”, Proceedings of The 7th International Symposium on Landslides, pp.147~152.
  36. Baldelli, P., Aleotti, P. and Polloni, G.(1996), “Landslide-susceptibility Numerical at The Messina Straits Crossing Site”, Proceedings of The 7th International Symposium on Landslides, Italy, pp.153~158.
  37. Bishop, A.W. and Blight, G.E.(1963), "Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils", Geotechnique, Vol 13, pp.177~197.
  38. Brand, E.W.(1981), “Some thoughts on Rainfall-induced Slope Failures”, Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics Foundation Engineering, Stockholm, The Netherlands, pp.373~376.
  39. Braza M.D.(1998), “Principles of Geotechnical Engineering”, Fourth Edition, Thomson Learning, p.764.
  40. Charles, W.W.N. and Bruce, M.(2007), “Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering”, Taylor and Francis Group. pp.115~125.
  41. Cruden, D.M.(1991), “A Simple Definition of A Landslide”, Bulletin of The International Association of Engineering Geology, Vol. 43, pp.27~29.
  42. Dai, F.C., Lee, C.F. and Ngai, Y.Y.(2002), “Landslide Risk Assessment

- and Management : An Overview”, Engineering Geology, Vol. 64, pp.65~87.
43. Dou, J., Yamagishi, H., Pourghasemi, H.R., Yunus, A.P., Song, X., Xu, Y. and Zhu, Z.(2015), “An Integrated Artificial Neural Network Model for The Landslide Susceptibility Assessment of Osado Island”, Natural Hazards, Vol. 78, pp.1749~1776.
  44. Edlefsen, N.E. and Anderson, A.B.(1943), “Thermodynamics of Soil Moisture”, Hilgardia, Vol. 15, pp.31~298.
  45. Ermini, L., Catani, F. and Casagli, N.,(2005), “Artificial Neural Networks Applied to Landslide Susceptibility Assessment”, Geomorphology, Vol. 66, pp.327~343.
  46. Fredlund, D.G.(2002), "Teaching Unsaturated Soil Mechanics as Part of The Undergraduate Civil Engineering Curriculum", Pan American Conference on Geotechnical Engineering Education, Quito, Ecuador, November, pp.23~27.
  47. Fredlund, D.G. and Xing, A.(1995), "The Relationship of The Unsaturated Soil Shear Strength Function to The Soil-water Characteristic Curve", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 32, pp.440~448.
  48. Giannecchini, R. and Pochini, A.(2003), “Geotechnical Influence on Soil Slips in The Apuan Alps (Tuscany) : First Results in The Cardoso Area, Proc. International Conference on Fast Movements–Prediction and Prevention for Risk Mitigation(IC-FSM 2003), pp.241~245.
  49. Highland, L. and Johnson, M.(2004), “Landslide Types and Processes”, Fact Sheet 2004-3072, USGS, p.40.
  50. Holtz, W.G. and Gibbs, H.J.(1956), “Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils”, Journal of Soil Mechanics and Foundation, ASCE, p.1,867.
  51. Hutchinson, J.N.(1988), “Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrology”, In Landslides Proc. 5<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, Vol. 1, pp.3~35.

52. Kanungo, D.P., Arora, M.K., Sarkar, S. and Gupta, R.P.,(2006), “A Comparative Study of Conventional”, *Geology*, Vol.85, pp.347~366.
53. Liener, S., Kienholz, H., Liniger, M. Krummenacher, B.(1996), “SLIDISP-A Procedure to Locate Landslide Prone Area, Proceedings of The 7<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, pp.279~284.
54. Lu, N. and Likos, W.J.(2006), “Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, pp.131~142.
55. Lu, N., Godt, J.W. and Wu, D.T.(2010), “A Closed-form Equation for Effective Stress in Unsaturated Soil”, *Water Resources Research*, Vol. 45, pp.892~898.
56. Lumb, P.(1975), “Slope Failures in Hong Kong”, *Quartly Journal of Engineering Geology*, Vol. 8, pp.31~65.
57. Mathewson, C.C., Keaton, J.R. and Santi, P.M.(1990), “Role of Bedrock Ground Water in The Initiation of Debris Flows and Sustained Post Flow Stream Discharge”, *Bulletin of Association of Engineering Geologists*, Vol. 27, No. 1, pp.73~83.
58. Montgomery, D.R., Schmidt, K.M., Greenberg, H.M., Dietrich, W.E.(2000), “Forest Clearing and Regional Landsliding”, *Geology*, Vol. 28, pp.311~314.
59. Olivier, M., Bell, F.G. and Jemy, C.A.(1994), “The Effect of Rain Fall on Slope Failure, with Examples from The Greater Durban Area”, *Proceedings 7<sup>th</sup> Intern. Cong. IAEG*, Vol. 3, pp.1629-1636.
60. Richards, B.G.(1965), “Measurement of The Free Energy of Soil Moisture by The Psychrometric Technique using Thermistors”, *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Area*, Butterworth, pp.39~46.
61. Sewell, R.J. and Fletcher, C.J.N.(2000), “Pilot Study on Regolith Mapping in Hongkong”, *Geological Report GR 1/2000, GEO*, p.45.
62. Shahri, A.A., Spross, J., Johansson, F. and Larsson, S.(2019), “Landslide Susceptibility Hazard Map in Southwest Sweden using Artificial Neural

- Network”, Catena, Vol. 183, pp.104.
63. Sitar, N., Anderson, S.A. and Johnson, K.A.(1992), “Conditions Leading to The Initiation of Rainfall-induced Debris Flows”, Geotechnical Engineering Specialty Conference Stability and Performance of Slopes and Embankments-II, ASCE, New York, pp.834~839.
  64. Turrini, C.M. and Visintainer, P.(1998), ”Proposal of a Method to Define Areas of Landslide Hazard and Application to an Area of The Dolomites“, Engineering Geology, Italy, Vol. 50, pp.255~265.
  65. Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G. and Pufahl, D.E.(1996), "The Relationship Between The Soil-water Characteristic Curve and The Unsaturated Soil Shear Strength of A Compacted Glacial Till", Geotechnical Testing Journal, Vol. 19, pp.259~268.
  66. van Genuchten, M.T.(1980), “A Closed form Equation Predicting The Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.” Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, pp.892~898.
  67. Varnes, D.J.(1978), “Slope Movement Types and Process”, National Academy of Science, Washington, D.C., Special Report, Vol. 2, pp.11~33.

## 감사의 글

다소 늦은 학업에 길이였지만 본 논문을 잘 마무리하여 끝나기까지 많은 분들의 도움과 격려에 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 회사경영과 학교생활을 함께 하면서 바쁘게 보낸 지난 시간들이 매우 소중한 시간이었으며 돌이켜보면 가슴 벅찬 나날들이었습니다.

논문이 완성되기까지 바쁜 학사 일정에도 아낌없이 깊은 관심과 애정으로 한결같이 학문의 길로 이끌어 주신 지도교수님이신 김대현 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드리며 또한 부족한 논문을 지도해주시고 심사위원장이신 김성홍 교수님을 비롯하여 심사위원이신 박정웅 교수님, 장우식 교수님, 조선이공대학교 박경호교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

그리고 늘 함께 걱정해주시고 용기를 북돋아주신 토질연구실 모든 분들에게도 깊은 감사를 드리며 앞으로 그 마음을 소중히 간직하여 기회가 된다면 저 또한 모든 분들에게도 똑같은 마음으로 잘 될 수 있도록 최대한 함께 하고자 합니다. 그 외에도 본 연구가 진행되어 오는 동안 시작부터 끝까지 많은 도움을 준 모든 분들에게도 진심어린 감사의 마음을 전합니다.

끝으로 사랑과 믿음으로 언제나 저의 곁에서 묵묵히 지켜봐 주시며, 성원해주신 나의 부인과 아들 및 가족, 친지, 지인분들에게도 진심으로 감사의 말씀을 전하며 저 또한 더욱더 행복한 가정이 될 수 있도록 노력하겠습니다.

박사논문의 완성은 새로운 나의 출발이자 그 품격에 맞는 인격과 실력을 겸비해야 하므로 자신에 부끄럽게 앓는 삶이 되도록 앞으로도 더욱 정진하고자 하며 지금까지 도와주신 모든 분들의 그 뜻에 보답하고자 항상 최선의 노력을 다하겠습니다.

2022년 8월  
정찬욱 배상