

최 종
보 고 서

역학적 기법을 이용한
자연사면의 재해 예측 시스템 개발
Development of Natural Slope Hazard Prediction
System by means of the Physically Based
Modelling

주관연구기관 : 서울대학교

협동연구기관 : 충북대학교

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “역학적 기법을 이용한 자연사면의 재해 예측 시스템 개발”의 최종보고서로 제출합니다.

2007년 05월 일

주관연구기관명 : 서울대학교

총괄연구책임자 : 장 병 옥

세부연구책임자 : 장 병 옥

선 임 연구 원 : 손 영 환

선 임 연구 원 : 김 성 필

선 임 연구 원 : 허 준

연 구 원 : 김 응 구

연 구 원 : 민 창 식

연 구 원 : 노 수 각

연 구 원 : 김 상 훈

연 구 원 : 봉 태 호

연 구 원 : 조 중 기

연 구 원 : 임 성 윤

연 구 원 : 류 태 진

협동연구기관명 : 충북대학교

협동연구책임자 : 송 창 섭

요 약 문

I. 제목 : 역학적 기법을 이용한 자연 사면의 재해 예측 시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

본 연구에서는 자연사면의 위험성 평가에 지형학적, 지질학적, 기상학적 그리고 지반공학적 요인들과 정보공학적 기법들을 종합적으로 고려하여 자연사면의 재해예측 시스템을 개발하고자 한다.

2. 연구개발의 필요성

우리나라는 전 국토의 75% 정도가 산지로서, 대부분의 산지지형은 가파르며, 기반암을 덮고 있는 표토층의 두께가 비교적 얇은 층상구조를 가지고 있다. 또한, 우리나라는 연평균 강우량이 1,300mm~1,500mm정도로 대부분 7, 8, 9월 사이에 집중적으로 내리는 강우특성을 가지고 있다. 이러한 지형, 지질 및 기후 특성으로 인하여 사면 붕괴로 인한 재해가 빈번하게 발생하여 많은 인명, 재산피해 및 자연자원의 손실을 입고 있다. 자연사면 및 절개지 붕괴는 자연자원의 자체적 손실뿐만 아니라, 인명, 토양유실, 교량, 도로, 농지, 농업수리시설, 가옥 및 문화재 등의 2차, 3차 피해를 유발할 수 있다는 것에 문제의 심각성이 있다. 지금까지의 산지재해에 대한 대책은 복구에 초점이 맞추어져 있으며, 또한 복구를 위한 피해지역의 위치, 규모와 같은 정보를 얻기 까지 많은 시간, 인력, 비용이 소요되고 있는 실정이다.

현재 우리나라에서는 산림청에서 산사태 예보제를 실시하고 있으나, 강우량에만 의존하는 수준이어서 실제 사면파괴 기작을 고려하지 못하고, 중·장기적인 재해예측 및 예방시스템이 갖추어져 있지 않은 실정이다. 또한 산림청의 산사태 판정기준표는, 제 인자들의 구분 및 점수의 부여 기준이 명확하지 않고, 상대적인 기준을 적용하고 있어서

정량적 판정이 되지 못하고 개략적인 판정에 머물러 있다.

따라서 사면 붕괴에 따른 피해를 저감시키기 위하여 사면의 위험성 예측 및 붕괴 방지 대책 수립이 요구된다. 또한 자연사면의 위험성 평가에 지형학적, 지질학적, 기상학적 그리고 지반공학적 요인들과 정보공학적 기법들을 종합적으로 고려할 수 있는 자연사면의 재해예측 시스템의 개발이 필요하다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 현장 모니터링 및 자연사면 수리, 수문특성 분석

- 가. 자연사면 붕괴 발생현황, 특성 등 조사
- 나. 지하수위, 간극수압, 함수상태 등 조사 및 샘플채취
- 다. 증발산량, 강우에 의한 침투, 유출량 조사

2. 유발인자 영향 규명

- 가. 식생인자 영향 규명
- 나. 토질인자 영향 규명
- 다. 지형인자 영향 규명
- 라. 수리/수문 인자 영향 규명

3. 지형패턴 분석을 통한 자연사면 위험성 해석 기법 개발

- 가. 사면형상 추출
 - 지형자료 구축 및 단위셀 별 사면경사, 표고, 경사위치, 사면방향, 곡률 산정
 - 능선 및 계곡의 추출
 - 파괴가능 사면형상 추출
- 나. 사면형태에 대한 패턴 분류
 - 사면의 기본형에 대한 사면패턴 분류
 - 추출사면에 대한 사면패턴 분류
- 다. 사면패턴별 사면안정성 평가
 - 사면패턴별 사면안정성 평가

4. 사면안정성 평가 프로그램 개발

가. GIS/DB 설계 및 자료구축

- 수치지형도, 토양도, 지질도, 임상도 및 기타 자료 수집

나. 역학적 기법에 의한 사면안정성 평가 시스템 개발

- 사면안정모형 및 수리·수문 모형을 이용한 평가시스템 개발

다. 현장 적용을 위한 업무용 프로그램 개발

- 실무적용을 위한 ArcGIS 환경 프로그램 개발

5. 재해 예측지역에 대한 대안제시

가. 기상, 토질, 식생 및 지질 자료획득 및 관리방안 제시

나. 재해 예측지역에 대한 대안 및 대책공법 제시

IV. 연구개발의 결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구개발 결과

가. 산사태 분류 방법 및 산사태 발생 원인에 대한 조사와 국내외 산사태 발생 현황에 대하여 연구하였다. 산사태 분류방법은 분류하는 기준에 따라 차이를 보이거나 산사태 발생 원인과 규모를 정의한다는 공통점이 있다. 이 중 Varnes가 1978년에 제안한 분류법이 가장 널리 쓰이고 있다. 산사태 발생원인은 내·외적 요인과 자연·인위적 요인으로 구분하였으며 여러 인자들의 영향을 살펴보았다. 산사태는 보통 강우로 인하여 발생하지만 그 지역의 특성에 따라 발생 여부가 달라지므로 발생요인을 종합적으로 분석할 필요가 있으며 그 역학적 기작에 대한 연구가 필요하다. 국내 산사태는 보통 강우로 인한 쇄설성 유동이 발생하며 각 국가별로 토질, 지질, 강우조건, 지반조건에 따라 다른 형태의 산사태가 발생하게 된다.

나. 산사태 발생 지역에 대한 현장 조사를 통하여 경기도 양주시 장흥지역을 대상으로 선정하였다. 자연 사면의 실제 거동을 분석하기 위해 계측기를 설치하여 현장 모니터링을 수행하였다. 또한 내적 요인인 지형과 토질, 지질 등을 파악하기 위해 대상지에서 시료를 채취하여 실내 시험을 통하여 기초물성을 파악하였으며, 시험굴 조사와 물리탐사인 비저항 탐사를 실시하여 지반 구조 및 지질을 조사하였다. 그리고 시스템 개발

을 위한 기초자료로 토양 함수비와 지하수위의 지속적인 모니터링이 필요하여 대상지를 새로 선정하고 심도별 함수비와 지하수위의 데이터를 일정한 간격으로 수집하였다.

다. 자연사면 재해 위험성 평가 시스템 개발을 위하여 역학적 기법을 이용한 결정론적 기법의 산사태 예측모델과 이에 이용되는 수리/수문 모형 및 산사태 유발인자의 영향을 연구하였다. 시스템 개발의 일환으로 지형인자를 고려할 수 있는 자연사면 위험성 해석기법을 개발하였다. 또한 기존 자연사면 위험성 평가에 있어 적용되었던 침투모델과 습윤지수를 이용한 무한사면안정해석방법의 한계점을 분석하고 이를 극복할 수 있는 모델을 개발하고 검증하였다. 그 결과 수정된 침투모델은 비정상강우를 고려함으로 자연상태 예측에 더 효과적이었으며 강우시작 시점부터 침투율을 시간간격으로 확인할 수 있었다. 또한 역학적 기법의 해석 결과와 동역학 모델을 이용하여 지표하 흐름분석을 하여 습윤지수를 산출한 후 사면안정해석을 한 결과를 비교한 결과 본 연구에서 제안된 방법이 실제로 발생 산사태의 흔적과 더 높은 일치율을 보였다.

라. 지리정보시스템을 이용하여 광역산사태 위험성도를 작성하고 산사태 예측 모델을 구동시키기 위한 데이터베이스를 구축하고, 사면별 안전율 지도와 소유역별 안전율 지도를 작성하였다. 또한 본 연구에서 개발된 수정된 침투와 지표하 흐름 모델의 적용하여 실제 자연 강우사상을 반영할 수 있고 지표하 흐름을 모사할 수 있는 광역적인 범위의 사면안정성 평가 프로그램을 개발하고 대상지역에 적용하여 대상지역에서 실제 발생한 산사태와의 비교를 통해 실효성을 검증하였다.

마. 마지막으로 한국의 지형과 기후의 특성에 맞는 사면붕괴의 피해저감 대책 마련을 위하여 사면붕괴에 대한 방지대책 공법에 대하여 고찰하였다. 그리고 일본, 미국, 홍콩의 사례를 통하여 해외에서 시행되고 있는 사면붕괴 방지대책 공법들을 살펴보았다. 또한 사면붕괴방지 및 사면안정을 위한 신공법에 관하여 고찰하고 나아가 국내 지형과 기후 및 발생 산사태 특성을 고려하여 국외 및 새로 개발된 사면붕괴 방지 공법의 국내적용 가능성을 검토하였다. 연구된 공법들 각각의 장단점과 적용가능 지형에 대한 정보를 숙지하여 지형 성격에 맞는 공법을 사용을 결정하여 현장 지형의 특수성을 고려할 수 있어야 하며 공법의 선택에 있어서 공학적 우수성뿐만 아니라 시공의 경제성과 공법의 환경친화성까지도 고려해야 할 것이라 판단된다.

2, 기대효과 및 활용방안

가. 기대효과

본 연구로 기대할 수 있는 효과는 다음과 같다.

- 국내 자연사면에 대한 침투기작, 수분분포 특성 파악
- 산사태 가능성에 대한 시간적·공간적 분석 및 파악
- 역학에 기반을 둔 광역적 사면안정성 평가기법 개발
- GIS와 수문모형, 사면안정모형의 통합
- GIS 기술, 지반, 수문 및 지질 등에 대한 종합적인 지식을 갖춘 인력을 양성
- 상기분야의 지속적인 석·박사의 배출
- 재해예측 및 자원관리 분야의 인력배출 가능
- 산사태 예·경보시스템의 자료로서 활용
- 사면관련 재해가 발생할 수 있는 지역에 대한 개발 제한
- 국토개발계획 및 지역개발정책에 활용
- 산사태 발생지역에 신속한 복구를 위한 자료제공

나. 활용 방안

본 연구의 결과로 역학에 기반을 둔 광역적 사면 안정 평가 기법 및 예측 시스템 개발에 관한 자료 제공하여 사면 안정 평가 자료로 활용하며 기술개발 결과의 적극적 홍보를 통하여 관심을 극대화 시킬 수 있다. 또한 연구결과를 학술지에 발표함으로써 향후 자연사면 안정 평가 기술 개발에 기초자료로 활용될 수 있다. 주 대상지역인 농어촌의 자연사면 안정성 평가와 지역개발억제수단으로 활용될 수 있으며 자연경관 및 친환경적 개발을 위한 기술로 활용이 가능하다.

국가기관에서는 거시적인 국토개발계획 정책수립을 위한 자료제공 및 의사결정지원과 산지자원 재해 위험도 맵 구축에 의한 국토자원관리, 정부 산하기관과 연계한 지역개발정책 수립 등에 활용할 수 있을 것이라 판단된다. 정부산하단체의 산지에 대한 절·성토계획, 산업입지 선정, 산지개발, 택지개발, 토양 형질변경 등이 요구되는 곳에서 자연재해를 예측을 위한 대한 정책적 판단에 대한 의사결정지원에 판단기준을 제공해주며 지방자치단체와 연계한 산지 개발사업 수행 및 개발억제 기준 마련이 가능하다. 지방자치단체의 경우, 자치단체에서 자연경관의 보전 및 친환경적 개발을 위한 의사결정을 지원하고 적지관정 및 무분별한 개발 억제 수단으로 활용될 수 있다.

SUMMARY

I. Title

Development of system for an analysis on slope stability using mechanical method

II. Objectives and Importance of the research

1. The purpose of this study

This study is carried to develop a system to analyze slope stability considering topological, geological, meteorological, geotechnical factors and GIS

2. The need of this study

75% of total land in Korea is composed of mountains, which have steep slopes and thinly stratified surfaces covering bedrocks. And it rains densely in July, August and September from 1,300mm-1,500mm. Slope failure due to these topological, geological and meteorological factors in Korea causes casualties, economic damages and loss of natural resources. But this can be more a disaster from the viewpoint that it often links to the second and the third damage all over the country. Most solutions for mountainous disasters which require much money, time, and endeavor to get information for restoration are focused on restoration. Now KFS(Korea Forest Service) that is not yet equipped with long-term system is carrying out instant warning system for slope failure, but it only depends upon rainfall not considering real mechanism of slope in failure.

And also criteria for slope failure from KFS is not clear. So it can not provide quantitative judgement but qualitative one. Therefore reasonable solution and prediction for slope failure and also a system which simultaneously consider many

factors is needed to reduce the damage.

III. Contents and scope of the research

Contents and scope of the research are as follows.

1. In-situ monitoring and analysis of hydraulic and hydrologic features in natural slope

- a. Study on present state and feature of natural slope failure.
- b. In-situ test for ground-water table, pore pressure and sampling.
- c. Study on infiltration and runoff due to evapotranspiration and rainfall

2. Influencing Factors

- a. Vegetation
- b. Soil property
- c. Topological factor
- d. Hydraulic/Hydrologic factor

3. Development of analyzing method for natural slope stability through classifying

- a. Topological pattern
- b. Extraction of topology
 - Topology DB construction and slope steepness, elevation, site, orientation, curvature per unit cell
 - Extraction of ridge and valley
 - Extraction of fragile topology pattern
- c. Topological pattern classification

- Basic classification
- Classification in extracted slope
- d. Evaluation of stability for each slope pattern

4. Development of evaluating program for slope stability analysis

- a. Design and construction of GIS/DB
 - Collection of digital topographic map, soil map, geological map, vegetation map
- b. Development of stability evaluating system adapting mechanical method
 - Development of evaluating system through model considering factors
- c. Development of practical program applicable in field
 - Development of practical program based on ArcGIS

5. Alternative for failure vulnerable area

- a. Aquisition and management of meteorological factor, geological factor, soil and vegetation
- b. geotechnical method and alternative for failure vulnerable area

IV. Results of Research

a. Classification methods, intriguing factors for slope failure and many worldwide failure cases were examined. Though there are many different kinds of classification methods they are all the same in that they define the causes and the scale of slope failure. Among them the method by Varnes in 1978 is widely adapted. He divided the causes into external and internal one also, natural and artificial one. For example the most influent factor is known as rainfall. but regional differences can accelerated or decelerated the effect from rainfall. that is to say the need for synthesized analysis considering many factors in total increases.

Shallow slope failure in Korea is mostly occurred from rainfall but each country has its own failure pattern because of their indigenous soil depth, geology and rainfall.

b. Gyeonggi-do Yangju-si Jangheung area which contains some failed slope was chosen for the study. For analysis of real movement in natural slope, sensors were fixed, and field conditions were monitored, and lab test was also done to get basic properties related to internal factors. Ground structure and geological feature was obtained by in-situ boring test and electric resistivity test. And fundamental data like water content and ground water table per depth were observed regularly in newly chosen area for the development of system

c. Deterministic method using mechanical process and slope failure intriguing factors like hydrological/hydraulic one was examined to develop stability evaluating system. As a part of developing process, an analyzing method that is able to consider topological factor was developed, and shortcomings in old model were also overcome by newly developed one. The results were thoroughly verified. The modified model provides more reasonable results for natural condition by adapting unsteady rainfall. Also regular observation on infiltration can be possible from the start of rainfall. And the results from the modified model and dynamic model using calculated wetting index in subsurface were compared with each other. The modified one shows the better results by simulating closer to real slope failure in the area.

d. Slope failure risk in a wide area was analyzed by GIS and based on this, risk index map was depicted. In addition, a DB was built to support the development of model and safety factor map for each slope and small basin was depicted too. Finally a program in which modified infiltration in subsurface and unsteady rainfall was applied for analysis of slope stability in a wide area was developed. It was verified by comparison in data from model and the chosen area.

e. Lastly engineering and biotechnical solutions that reduce damage from slope failure and reflect domestic topology and climate were examined. And also slope

stabilization techniques which are newly developed were studied by analyzing foreign cases in Japan, USA, and Hong kong. their possibilities of application in korea was examined also.

A strong and weak point of studied techniques and indigenou topology both must be considered and engineering alternatives for slope stabilization also must be practical, economic and pro-environmental according to those consideration.

Contents

Chap. 1 General	1
Sec. 1 Objectives of the research	1
Sec. 2 Importance of the research	2
1. Need of the research	2
2. Present state and problem in existing techniques	6
3. Prospect	12
4. Pertinence of the research	13
Sec. 3 Contents and work scopes of the research	15
1. Content of the research	15
2. Annual objectives and contents	17
3. Procedures of the research	19
Chap. 2 Present state of researches	23
Sec. 1 Domestic researches	23
Sec. 2 Foreign researches	25
Chap. 3 Characteristics and existing condition of landslide	27
Sec. 1 Introduction	27
Sec. 2 Characteristics	28
1. Definition of landslides	28
2. Classification of landslide	28
3. Cause of landslide	38
Sec. 3 Existing condition of landslide	53
1. Domestic condition of landslide	53
2. Foreign condition of landslide	59
Sec. 4 Summary and conclusion	72
Chap. 4 Research area and field monitoring	74
Sec. 1 Introduction	74
Sec. 2 Research area	75
1. Field investigation	75

2. Choice of research area	84
Sec. 3 Field monitoring	85
1. Burial of measure instruments	85
2. Measuring items	85
3. Geophysical explorations	92
Sec. 4 Continuous field monitoring and exploration	106
1. Continuous field monitoring	106
2. Topological and geological analysis	114
Sec. 5 Summary and conclusion	122
Chap.5 Development of evaluating system for natural slope stability	124
Sec. 1 Introduction	124
Sec. 2 Background theories	125
1. Introduction	125
2. Model for predicting landslide	125
3. Hydrological/hydraulic model	157
Sec. 3 Analysis of landslide inducing factors	175
1. Introduction	175
2. Soil property factor	175
3. Infiltration/Runoff factor	197
4. Topological factor	204
5. Vegetation factor	211
6. Conclusion	225
Sec. 4 Development of analyzing method considering topological pattern for slope stability	227
1. Introduction	227
2. Extraction and analysis of topological pattern	227
3. Slope stability analysis according to patterns	237
4. Conclusion	243
Sec. 5 Development of infiltration model considering unsteady rainfall	244
1. Introduction	244
2. Methods and materials	244

3. Results and discussion	246
4. Conclusion	261
Sec. 6 Development of analyzing method considering subsurface flow for slope stability	263
1. Introduction	263
2. Components of model	263
3. Materials and method	272
4. Collection of materials	276
5. Results and discussion	281
6. Conclusion	300
Sec. 7 Summary and conclusion	301
Chap. 6 Development of practical program	303
Sec. 1 Introduction	303
Sec. 2 GIS and Database for analysis	304
1. introduction	304
2. Introduction of ArcGIS	304
3. Design of GIS for analysis	035
4. DB for analysis	306
5. Landslide detection	308
6. Conclusion	310
Sec. 3 Development of program	311
1. Introduction	311
2. Development of risk analyzing program	311
3. Applied theories to program	312
4. Input data designing	313
5. Calculation result	318
6. Conclusion	318
Sec. 4 Summary and conclusion	319
Chap. 7 Methods of stabilization for vulnerable area	320
Sec. 1 Introduction	320

Sec. 2 Engineering methods for slope stabilization	321
Sec. 3 Engineering methods for slope stabilization	334
Sec. 4 New methods for slope stabilization	341
Sec. 5 Examination on the applicability of methods	347
Sec. 6 Summary and conclusion	373
Chap.8 Degree of achievement and distribution to related field	375
Sec. 1 Degree of achievement	375
Sec. 2 Degree of distribution to related fields	377
1. Engineering aspects	377
2. Economic and industrial aspects	377
Chap. 9 Application plan of the result from the research	379
Sec. 1 Application plan for various fields	379
Sec. 2 Application plan for various organizations	380
Reference	390

목 차

제 1 장 연구개발 과제의 개요	1
제 1 절 연구개발의 목적	1
제 2 절 연구개발의 필요성	2
1. 연구의 필요성	2
2. 국내외 관련기술의 현황과 문제점	6
3. 앞으로의 전망	12
4. 기술도입 타당성	13
제 3 절 연구개발의 내용 및 범위	15
1. 연구개발 내용	15
2. 연차별 연구개발 목표와 내용	17
3. 연구개발 방법 및 설계	19
제 2 장 국내외 연구현황	23
제 1 절 국내현황	23
제 2 절 국외현황	25
제 3 장 산사태 특성 및 발생 현황 연구	27
제 1 절 서론	27
제 2 절 산사태 특성 연구	28
1. 산사태 정의	28
2. 산사태 분류	28
3. 산사태 발생원인	38
제 3 절 산사태 발생 현황 연구	53
1. 국내 산사태 발생 현황 연구	53
2. 해외 산사태 발생 현황 연구	59
제 4 절 요약 및 결론	72
제 4 장 대상지 선정 및 현장 모니터링	74
제 1 절 서론	74
제 2 절 대상지 선정	75
1. 현장조사	75

2. 대상지 선정	84
제 3 절 현장 모니터링	85
1. 계측기 매설	85
2. 계측항목	85
3. 현장 지층분석을 위한 지반조사(물리탐사)	92
제 4 절 지속적인 현장 모니터링 및 지반조사	106
1. 지속적인 현장 모니터링	106
2. 지형 및 지질분석	114
제 5 절 요약 및 결론	122
제 5 장 자연사면 재해 위험성 평가 시스템 개발	124
제 1 절 서론	124
제 2 절 이론연구	125
1. 개요	125
2. 산사태 예측모델	125
3. 수리/수문 모형	157
제 3 절 유발인자 영향 규명	175
1. 개요	175
2. 토질인자 영향 분석	175
3. 사면 침투특성 영향 분석	197
4. 지형인자 영향 분석	204
5. 식생인자 영향 분석	211
6. 결론	225
제 4 절 지형 패턴 분석을 통한 자연사면 위험성 해석기법의 개발	227
1. 개요	227
2. 사면형상 추출 및 지형패턴 분석	227
3. 사면패턴별 사면 안정성 평가	237
4. 결론	243
제 5 절 비정상 강우를 고려한 강우 침투 시스템의 개발	244
1. 개요	244
2. 재료 및 방법	244
3. 결과 및 고찰	246

4. 결론	261
제 6 절 지표하 흐름을 고려한 자연사면 위험성 해석기법의 개발	263
1. 개요	263
2. 모델의 구성	263
3. 재료 및 방법	272
4. 자료수집	276
5. 결과 및 고찰	281
6. 결론	300
제 7 절 요약 및 결론	301
제 6 장 실무 프로그램 개발	303
제 1 절 서론	303
제 2 절 지리정보시스템의 설계 및 자료구축	304
1. 개요	304
2. AcrGIS 소개	304
3. 지리정보시스템의 설계	305
4. 지리정보시스템 자료구축	306
5. 산사태 위치파악	308
6. 결론	310
제 3 절 프로그램 개발	311
1. 개요	311
2. 위험성 평가 프로그램 개발	311
3. 프로그램 적용이론	312
4. 입력 데이터 설계	313
5. 결과 산출	318
6. 결론	318
제 4 절 요약 및 결론	319
제 7 장 재해 예측지역에 대한 대안·대책공법 제시	320
제 1 절 서론	320
제 2 절 사면붕괴 방지 대책공법	321
제 3 절 해외의 사면붕괴 방지대책	334
제 4 절 사면붕괴 방지대책 신공법	341

제 5 절 사면붕괴 방지 대책공법 적용성 검토	347
제 6 절 요약 및 결론	373
제 8 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	375
제 1 절 목표달성도	375
제 2 절 관련분야에의 기여도	377
1. 기술적 측면	377
2. 경제·산업적 측면	377
제 9 장 연구개발결과의 활용계획	379
제 1 절 분야별 활용계획	379
제 2 절 기관별 활용계획	380
참고문헌	390

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 목적

본 연구에서는 자연사면의 위험성 평가에 지형학적, 지질학적, 기상학적 그리고 지반공학적인 요인들과 정보공학적 기법들을 종합적으로 고려하여 자연사면의 재해예측 시스템을 개발하고자 한다. 즉, 토양 내 수분의 양 및 흐름 상태를 재현하는 수문모형과 사면안정해석모형을 통합하고 식생이 자연사면의 위험성에 미치는 영향을 고려한 시스템을 개발함으로써 농촌지역을 중심으로 한 자연재해 예측시스템으로 활용할 수 있는 자료를 제공하고자 한다. 연구개발의 목표는 크게 다음과 같다.

- 현장 모니터링 및 자연사면 수리, 수문특성 분석
- 산사태 유발인자 영향 규명(식생, 토질, 지형, 수리·수문)
- 지형패턴 분석을 통한 자연사면 위험성 해석 기법 개발
- 지리정보시스템을 이용한 자연사면 재해 위험성 평가 기법 개발
- 재해 예측지역에 대한 대안·대책공법 제시

제 2 절 연구개발의 필요성

1. 연구의 필요성

현재 우리나라의 농촌은 도시와 농촌의 상대적인 격차, 농촌지역의 기초생활환경의 낙후로 인한 도시집중화와 탈농현상, 농업인력 감소, 농업 인구의 노령화, 한계농지의 경작포기 등 많은 문제를 안고 있으며, 외적으로는 WTO 협약과 FTA 체결에 따른 농산물 시장 개방이라는 당면과제를 안고 있다. 이러한 국내·외적인 위기상황에서 농촌 사회의 삶의 질을 향상시키고 경제를 활성화시키기 위하여 자연환경을 이용한 관광자원의 개발이 대두되고 있다. 특히 최근 주5일 근무제의 도입으로 인하여 농촌은 휴식공간으로서의 가치가 부각되고 있으며 이러한 추세에 따라 관광자원의 개발은 더욱 필요하다 할 수 있다.

농촌의 관광자원 개발은 [농촌 어메니티]라는 패러다임을 반영하고 있는데, OECD(1997)는 농촌 어메니티(Amenity)를 사회구성원에게 휴양적, 심미적 가치를 제공하는 자원으로 정의하고 있다. 농촌 어메니티는 크게 물리적 환경과 지역사회·문화라는 요소로 구성되며, 여기서 물리적 환경은 물, 흙, 공기 등의 자연환경을 의미하며 보존과 개선을 통하여 지속가능한 관광·환경자원개발을 위한 토대가 된다. 최근 각 지역 자치단체에서 고장의 고유한 자연환경을 활용하여 어메니티 자원을 개발하고자 하는데, 그 중에서도 산지를 개발하여 관광 자원화하려는 시도가 활발하게 진행되고 있다. 자연자원의 보존에서부터 친환경적인 개발을 위해서는 자연 및 경관자원에 대한 합리적이고, 과학적인 접근이 필요하다. 특히, 환경적인 산지개발, 보존 혹은 적절한 규제를 위한 법적인 자료가 제공되어야 한다.

우리나라는 전 국토의 75% 정도가 산지로서, 대부분의 산지지형은 가파르며, 기반암을 덮고 있는 표토층의 두께가 비교적 얇은 층상구조를 가지고 있다. 또한, 우리나라는 연평균 강우량이 1,300mm~1,500mm정도로 대부분 7, 8, 9월 사이에 집중적으로 내리는 강우특성을 가지고 있다. 이러한 지질 및 기후조건과 무분별한 개발에 따른 산지훼손으로 매년 유사한 형태의 자연재해가 반복되고 있으며 이로 인하여 많은 인명, 재산 피해 및 자연자원의 손실을 입고 있다. 특히, 여름철 장마 및 태풍 등에 의한 집중호우로 인하여 발생하는 자연사면 및 절개지 붕괴는 막대한 피해를 초래하고 있다. 특히 지구온난화와 같은 기후환경의 변화로 자연재해는 더욱 빈번하게 발생하고 있다. 산업의 발달과 함께 산지나 구릉지가 도로, 철도, 임도, 택지 및 관광지 등으로 사용하기 위하

여 지형을 인위적으로 무분별하게 변경하는 경우가 많은 데 이로 인한 인명, 재산피해도 매년 증가하고 있다. 2002년에는 태풍 루사에 의한 기록적인 집중호우에 기인한 자연사면 및 절개지 붕괴로 81명(전체 자연재해 중 30%)의 사망과 막대한 재산손실을 가져왔으며, 2003년에도 태풍 매미로 인하여 막대한 손실을 초래하였다. 이와 같이 자연사면 및 절개지 붕괴는 자연자원의 자체적 손실뿐만 아니라, 인명, 토양유실, 교량, 도로, 농지, 농업수리시설, 가옥 및 문화재 등의 2차, 3차 피해를 유발할 수 있다는 것에 문제의 심각성이 있다. 지금까지의 산지재해에 대한 대책은 복구에 초점이 맞추어져 있으며, 또한 복구를 위한 피해지역의 위치, 규모와 같은 정보를 얻기 까지 많은 시간, 인력, 비용이 소요되고 있는 실정이다.

현재 우리나라에서는 산림청에서 산사태 예보제를 실시하고 있으나, 강우량에만 의존하는 수준이어서 실제 사면파괴 기작을 고려하지 못하고, 중·장기적인 재해예측 및 예방시스템이 갖추어져 있지 않은 실정이다. 또한 산림청의 산사태 판정기준표는, 제 인자들의 구분 및 점수의 부여 기준이 명확하지 않고, 상대적인 기준을 적용하고 있어서 정량적 판정이 되지 못하고 개략적인 판정에 머물러 있다.

자연재해에 대한 연구는 주로 단일사면 파괴에 대한 예측 및 보강에 대한 대책공법에 관한 연구가 많이 수행되어 왔으며, 최근에는 대규모 절취사면의 증가와, 광역적 재해예방의 필요성에 따라 GIS등의 기법을 이용한 유역 규모의 자연사면 재해위험지도 작성에 대한 연구가 시작되고 있다. 처음에는 산지재해 발생에 대한 기록중심으로 해석하여 왔으나, 근래에는 사면붕괴를 야기시키는 요인인 사면형태, 지질, 지하수, 토질, 강우, 식생 등의 인자와 자연사면 붕괴 빈도의 통계적인 관계 및 GIS 기법을 이용하여 자연사면 붕괴 가능성을 위험성도(Susceptibility map)로 작성하는 연구가 진행되어왔다. 이 접근법은 광범위한 면적을 대상으로 하며, 국내에서도 지질공학자들에 의하여 많이 연구가 되어 왔다. 그러나 이러한 **통계적인 접근법**은 상대적 위험성을 나타내는 수단으로서, 결과를 다른 지역에 적용하는 것이 곤란하며, 공간적 위험성만 알 수 있는 단점이 있다. 또한, 실시간 위험성 예측이 불가하며, 기후변화나 지형변화에 따른 장·단기적인 예측이 불가하다. 이 기법으로 산림청에서 수행된 산사태 평가 연구에서도 전국적인 단위의 개략적인 위험성 평가를 그 목표로 하고 있지만, 실제 위험성이 있는 지역에서의 정밀한 예측에는 무리가 있다. 한편, **물리·역학에 기반한 접근법**은 정량적인 안전율과 파괴확률을 제공할 수 있으며, 위험성의 시·공간적인 분포를 표현할 수 있는 장점이 있다.

상기 기법의 적용을 위해서는 여러 인자들에 대한 연구가 선행되어야 한다. 따라서

본 연구에서는 자연사면의 위험성 평가에 지형학적, 지질학적, 기상학적 그리고 지반공학적인 요인들과 정보공학적 기법들을 종합적으로 고려하여 자연사면의 재해예측 시스템을 개발하고자 한다. 즉, 선행강우에 의한 토양 내 초기조건의 변화와 실제 지형을 고려하여 위험성을 해석하고, 또한 토양 내 수분의 양 및 흐름 상태를 재현하는 수문모형과 사면안정해석모형을 통합하고 식생이 자연사면의 위험성에 미치는 영향을 고려한 시스템을 개발하여 농촌지역을 중심으로 한 국토의 자연재해 예측시스템으로 활용할 수 있는 자료를 제공하고자 한다.

가. 기술적 측면

1) 정보공학적 측면

광대한 공간 혹은 지형좌표에 의해 참조되는 자료를 다루는(획득, 저장, 관리) 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)과 적절한 공학적 모형들을 결합시키는 방법이 공학의 여러 분야에서 응용되고 있다. GIS 이용시, 소유역 내 산지재해 평가와 같이 많은 자료 입력이 필요한 경우 이를 효과적으로 저장, 해석 할 수 있으며, 광대한 자료의 데이터베이스로서의 역할을 할 수 있을 뿐 아니라 정성적 및 정량적인 자료가 존재하지 않는 속성들 사이가 아닌 공간적 관계를 통해 통합될 수 있기 때문에 GIS는 공간자료의 운영이 매우 중요한 토목공학에서 많이 응용되고 있다.

역학적인 기법의 연구를 위해서는 새로운 정보를 추가하여 평가할 수 있는 시스템이 필요하고, 여러 인자들의 변화로부터 미래의 산지재해를 예측할 수 있는 모의시스템도 필요하다. 실제로 산림청에서 수행한 통계적 기법의 연구는 국가단위의 광역적, 개략적 판정을 위한 목적으로 수행되었다. 이러한 연구는 자연사면에서의 인위적인 훼손, 기상 변화 등으로 소유역 산지에 대한 정밀한 위험성을 예측하는 데에는 적합하지 않으며, GIS의 활용수준도 낮다. 역학적 기법은 보다 정확한 예측을 가능하게 함은 물론 GIS의 활용성도 더욱 증가시킬 수 있다.

한편, 자연사면은 단순한 평형사면에서부터 매우 복잡한 굴곡의 사면까지 다양한 형태를 이루어져 있으므로, 이를 묘사하는 것은 매우 어렵다. **정보공학**은 복잡한 데이터로부터 특징적인 형태를 구분하는 기법으로 개발되었고 토목분야에서도 분류, 군집화, 지형인자 정의기법 등의 기법이 적용되고 있다. 자연사면에서 이러한 정보공학적인 기법들을 활용하면 실제 지형에 근사한 사면형상을 모델화 하고 안정성 평가를 수행하는 것이 가능하다.

2) 지반공학적 측면

자연사면의 파괴를 유발하는 인자에는 지질, 지형, 수리, 수문, 기상, 식생 그리고 지반(토질)인자들이 있다. 물리·역학에 근거한 접근법은 이러한 인자들을 이용하여 사면 안정도 해석을 수행하여 그 결과로서 위험성을 평가하고 위험성을 GIS를 이용하여 표현하고 분석한다. 그러므로 이들 인자들의 평가에 대한 연구가 먼저 수행되어야 한다.

강우, 지형, 산림 등 발생조건이 동일한 지역이더라도 암석을 구성하는 지질조건이 다를 경우 그 특성도 다르게 나타난다. 지질 특성을 고려한 연구는 일본, 홍콩 등 선진국에서도 최근 2000년부터 연구가 시작되었으나, 아직까지 지질별 자연사면 붕괴 특성을 구분하는 정도에 머무르고 있고, 정량적인 평가가 미흡한 실정이다.

지형의 굴곡 및 경사 등은 사면안정도 평가에 큰 영향을 미치게 된다. 단위 셀(unit cell)에 기반한 기존 연구에서는 사면의 기하학적 형상을 매우 단순화시킴으로서 실제 자연사면의 형태를 제대로 반영하지 못하는 단점을 내포한다. 또한, 셀의 크기를 작게 하는 경우 토심과 경사길이가 거의 차이가 나지 않는 오류를 내포하기도 한다. 보다 실제적인 평가를 위해서 단위 셀 단위의 기존 연구를 탈피하여 지형을 고려할 수 있는 새로운 접근방법이 요구된다.

사면의 파괴는 강우의 사면내 침투에 의한 강도감소로 인하여 붕괴가 발생하게 된다. 그러나 자연사면에서의 침투 및 수리적인 특성에 대한 연구가 미미한 편이다. 따라서 자연사면에서의 여러 수리·수문학적인 인자에 대한 연구가 수행되어야 한다.

한편, 식생의 영향에 대한 연구는 뿌리 보강에 의한 효과를 규명하고자 하는 연구가 수행되었으나, 식생의 종류 및 뿌리모양에 따라 효과는 아주 다르게 나타나므로, 이에 대한 정량적인 평가가 필요하다.

자연사면의 초기상태는 불포화상태이며, 강우에 의하여 포화상태로 바뀌게 된다. 자연사면은 수분의 증가에 따라 강도가 점차적으로 저감되며 되며, 결국 사면파괴에 이르게 된다. 지금까지 포화토에 대한 강도 및 체적변화에 대한 연구와, 불포화토의 체적함수비에 따른 강도 및 투수성의 변화는 국내 여러 연구자들에 의하여 연구가 수행되었으나, 국내 화강풍화토에 대한 연구와 기초자료가 부족한 실정이다.

나. 경제·산업적 측면

우리나라의 사면붕괴는 매년 7~9월 태풍 및 집중호우가 발생하는 시기에 집중적으로 발생하는 것이 특징이며, 산사태로 인하여 연평균 23명의 사망자(연평균 전체 사망자의 22%정도)와 막대한 재산피해를 초래하고 있다. 또한, 산업화·도시화에 따른 경

사지 개발로 인해 발생하는 산사태 및 사면붕괴로 인하여 인명 및 재산피해가 증가하고 있다.

자연재해는 사전의 위험성 평가와 적절한 대책공법으로 인명 및 재산 피해를 상당부분 감소시킨 예가 많다. 실제, 미국 캘리포니아에서는 재해예측, 발생가능지역에 대한 제한 및 규제, 방지대책, 경보시스템 개발 등 일련의 조치를 실시한 후 사면관련 피해가 90%이상 감소한 것으로 보고되었다. 우리나라의 농·산촌지역에서도 보다 정밀한 예측과 위험성 판정결과에 따른 대책공법을 적용한다면 경제적인 손실을 상당히 줄일 수 있을 것이다. 본 연구의 결과가 경제·산업적 측면에 기여하는 효과는 아래와 같다.

- 자연사면 재해 예·경보시스템의 자료로서 활용
- 사면관련 재해가 발생할 수 있는 지역에 대한 개발 제한
- 재해예방의 수단으로서 인명, 재산상의 손실을 방지
- 국토개발계획 및 지역개발정책에 활용
- 재해 발생지역에 대한 원인규명 및 신속한 복구를 위한 자료제공

다. 사회·문화적 측면

농촌 어메니티 자원은 농촌 고유의 휴양적, 심미적, 생태적, 경제적 가치를 지닌 자연환경, 전원경관, 생산품, 역사문화, 공동체 등의 유무형적 자원을 말한다. 대부분 자연자원과 문화자원으로 어메니티 자원은 직·간접적으로 전원공간과 관련된다.

자연사면 붕괴는 산림의 황폐화와 토양의 유실, 지형의 변형 등을 통한 자연자원가치의 감소를 직접적으로 초래하며, 산지인근의 건물, 유적지, 묘역 등을 파괴하거나, 수자원을 오염시키는 등 문화자원의 가치를 손상시키게 된다. 또한, 기반시설, 농업시설 등을 파괴하여 사회자원을 손상시키게 된다. 따라서 전원공간의 보전과 친환경적인 개발은 농촌 어메니티의 향상을 추구하는 방향으로 구현되어야 하며, 농촌의 전원공간인 소유역에서의 재해의 예지와 방제는 농촌 어메니티 자원의 보전을 위하여 매우 중요하다.

2. 국내·외 관련기술의 현황과 문제점

가. 외국연구

1) 광역 지질재해 위험성 평가 관련 연구

광역지질재해 예측 기술은 자연사면 붕괴의 예방 및 복구를 위하여 경제적이면서도 신속한 결과를 얻기 위한 방법으로서 연구가 시작되었다. 특히, 임지의 운영 및 목재의 이용이 중요한 미국이나, 산지가 많고 비가 많이 오는 홍콩, 일본에서 많이 연구되고

있다. 홍콩에서는 각종 사면에 대한 자료를 데이터베이스로 구축해오고 있으며, 사면재해 유발인자와 자연사면 붕괴와의 공간적 상관성을 비교·분석하고, 수경의 변화에 따른 발생가능성 평가연구를 진행하고 있다. 미국에서는 최근 지하수 수문모형과 사면모형을 이용하여 안정성 지수의 형태로 산지재해 발생가능성을 평가하는 연구를 시도하고 있다.

통계적 기법은 발생지와 각종 환경·지질·토질 인자들과의 상관관계에 의하여 발생가능성을 추정하는 기법으로서, 70년대부터 사용되어 왔다. 최근 연구의 경우, 홍콩의 Lantau 섬에 대하여 자연사면 붕괴와 유발인자(강우, 식생 등)사이의 공간적 관계를 통계적 기법을 이용하여 나타냈으며, 일본에서는 발생 규모와 사면경사의 관계를 통계적으로 나타냈다.

역학적 기법은 보다 좁은 지역에서 정밀한 예측을 수행하려는 목적으로 1980년대 미국과 일본에서 시작되었다. 이후, 미국에서는 무한사면 안정해석모형을 이용한 해석을 시도하였고 식생, 지진하중 등을 고려하려는 시도가 있었다. 국내 연구자들에 비하여 상당히 일찍 연구가 수행되었고, 수문현상을 고려하고자 하는 연구가 수행되었다. 그러나 인자들에 대한 명확한 규명보다는 통계적인 자료처리에 더 주안점을 두었으며, 따라서 지형, 식생 및 토질인자에 대한 연구는 미미한 실정이다. 또한, 사면안정 해석을 무한사면해석을 기준으로 수행하여 정확성이 결여되는 단점을 지니고 있다.

2) 지형, 토질, 식생 인자를 고려한 연구

지형인자는 표고, 경사, 방향, 경사길이, 경사위치, 굴곡도 등이 있으며, 대부분 경사에 초점을 두었으나, 최근 다양한 인자를 고려하고자 하는 시도가 있다. 지형과 산사태의 관계를 정립하려는 시도가 90년대 이루어 졌고, 2000년에는 GIS를 이용한 산사태연구에서 단일 격자에서 사면형태의 표현의 한계성을 제기하는 연구가 수행되기도 하였으나, 단위 셀 중심의 연구는 한계를 여전히 보여주었다. 그리고 좀더 지형학적인 요소를 도입하고자 하는 연구가 수행되고 있다. 한편, 얇은 사면의 무한사면해석 혹은 원호 파괴해석을 수행함에 있어서, 지형인자 뿐만 아니라 토심(soil depth)은 큰 영향을 미치게 된다. 90년대에 토심을 고려하려는 시도가 수행되었으나, 산사태 연구 분야에서는 이렇다 할 진전이 이루어지지 못하였다. 그 후 지질학 분야에서 토층의 풍화에 대한 접근을 통한 토심의 깊이를 추정하고자 하는 연구가 시도되었다. 식생의 효과에 대해서는 주로 뿌리의 강도증가효과에 대해서만 연구가 이루어져왔으며, 사면파괴와의 연관성에 대한 연구는 미미한 실정이다.

나. 국내연구

1) 광역지질재해 위험성 평가 관련 연구

GIS의 발달과 더불어 점차 광역적 재해지도 작성에 대한 연구가 시작되었다. 자연재해 방재기술 개발에 관한 연구는 국립 방재연구소 및 지질자원연구소에서 진행 중에 있으며, 과거 산림청에서 연구를 수행하였다. 이러한 통계적 기법 연구는 자연사면 붕괴를 야기시키는 요소(환경, 지질 및 기상 등)를 선정하고, 이들을 통계적 기법으로 상관성을 평가하여 광역적 자연재해 발생가능성을 평가하는 방향으로 진행되었다.

산림청에서는 산사태 위험지 판정표를 제작하였다. 여기에서 경사길이, 모암, 경사위치, 임상, 사면형태, 토심 및 경사도 등을 몇 가지 그룹으로 분류하여 각 그룹마다 점수를 부여하고, 매겨진 점수를 합하여 점수의 대소에 따라 위험성을 평가하게 된다. 그러나 부여된 점수의 근거는 조사지역의 자료만을 이용하여 근거가 다소 부족하고, 정량적인 평가가 이루어지지 못하고 있어서, 개략적이고 상대적인 비교만 가능하다. 2000년도에 산림청에서 수행한 산사태 위험도 판정 연구에서도 위 판정기준표에 의거 산사태를 판정하므로, 동일한 결함을 내포하고 있다. 이들 연구는 광범위한 지역에 대한 개략적인 판정결과를 주어, 국가단위에서 사용하려는 목적으로 개발되었으나, 아직 시행은 되지 않고 있다.

역학적 기법에 의한 연구는 국내에서는 아직, 지반공학자들에 의한 접근이 많지 않은 실정이다. 이는 현재까지 재해에 대한 사회적 인식의 수준이 높지 못했기 때문으로 판단된다. 그러나 점차 소득수준과 인명, 환경파괴 등에 대한 관심이 고조되므로, 보다 좁은 지역에 대한 정밀한 예측의 필요성이 증대되고 있는 실정이다. 2000년대에 들어와서 제주도 지역에 대하여 GIS 기법을 이용한 토석류의 발생 위험도 평가가 수행되었고, 매개변수의 불확실성을 고려한 광역적 산사태의 확률론적 접근이 시도되었다. 그러나 아쉽게도 이들 연구들은 외국의 연구들을 그대로 따르고 있으며, 국내의 지형, 지질, 수문, 지반 등의 환경적인 조건들에 대한 고려가 미흡하며, 장·단기적인 예측이 불가능한 실정이다.

2) 지형, 토질, 식생 인자를 고려한 연구

국내에서는 자연사면의 지형특성을 고려한 연구는 아직 수행되지 않고 있으며, 지리정보시스템에서 격자의 크기에 따른 경사도의 변화를 평가하는 수준에 머물러 있으나, 최근 굴곡도에 따른 발생빈도 연구가 수행되었다. 사면안정성 해석에 중요한 토심의 산정에 관한 연구의 경우 국내에서는 실측자료의 부족으로 대부분 정밀토양도의 유효토심을 실제토양의 두께로 판단하고 이용하였다.

토질인자 관련 연구에서는 국내사면 파괴특성을 고려한 토사사면의 안정해석 및 보

강기법 시스템 개발 연구(한국건설기술연구원, 2000)에서 불포화토의 공학적 특성에 대한 연구가 수행되었으나, 아직, 국내 화강풍화토 및 자연 사면의 대표적인 흙에 대한 기초자료가 부족한 실정이다. 단일사면에서의 모형실험 및 수치해석을 통한 사면내 침투해석은 여러 연구자에 의하여 수행되었으나, 자연사면에 대한 모니터링에 의한 연구는 수행되지 않고 있다.

식물의 뿌리와 상부는 각기 상반된 영향을 미치게 되나, 식생의 영향에 대한 연구는 아직 미미한 실정이다. 또한, 불포화토의 함수 특성과 식생을 복합적으로 고려한 자연 사면의 거동 모형 연구 개발이 필요하다.

다. 현 기술상태의 요약 및 취약부분

1) 광역지질 재해지도

현재 광역지질재해 관련 연구는 크게 유발인자와 발생빈도의 상관관계에 의하여 위험성을 평가하는 통계적 기법연구와 지형, 지질, 토질, 수리, 수문, 식생인자의 물리·역학적 관계를 이용하여 위험성을 평가하는 역학적(결정론적) 기법의 연구로 나눌 수 있으며, 위 연구와 함께 확률론적 기법연구도 수행되고 있다.

통계적 기법연구는 근본적으로 광범위한 지역을 평가대상으로 하고 있으므로, 간편한 방법으로 평가하여 정성적이고, 개략적인 결과를 제공하고 있다. 따라서 유발인자들에 대한 정량적인 평가가 이루어지지 않았다. 또한, 조사지역 외에 타 지역에 대한 적용성이 떨어지는 단점이 있다. 소유역 같은 보다 좁은 지역에 대한 정밀한 예측을 위해서는 역학적 평가 연구가 필요하다. 현재 국외에서는 사면안정해석을 수행함에 있어서, 제인자들에 대하여 상수화 혹은 간략화를 시도하고 있지만 정확성이 떨어진다. 이 분야의 국내 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 발생기구에 대한 과학적 접근을 통하여 인자들을 정량적으로 평가하고, 적절한 사면안정평가를 통하여 광역적 자연사면 붕괴 위험성을 평가하는 연구가 필요하다.

2) 현장 적용성

지금까지는 수치지도, 토양도, 기상자료 및 임상도 혹은 여러 기상, 수문자료 등의 부족으로 인하여 연구소 중심의 산사태 평가가 이루어져왔다. 그러나 NGIS 사업의 완성으로 인하여 많은 자료의 이용이 가능해졌으며, 점차 농촌 어메니티 관련 지역마다 자연 및 경관자원의 자체적인 관리업무가 더욱 요구됨에 따라 실무현장에서도 손쉽게 이용할 수 있는 평가시스템(프로그램)의 개발이 필요하다.

3) 현장 모니터링

기존 연구(산림청(2000), 김홍택(2001) 등)에서는 주로 수치지도, 토양도, 기상자료 및 임상도 등을 이용하여 간접적인 방법으로 인자들의 영향을 고려하였다. 또한, 지도 자료에만 의존하므로 자료의 축적 및 갱신이 되지 않으며, 일회적인 평가가 될 수밖에 없다. 역학적 기법을 적용하기 위해서는 인자들의 값을 정량화하여야 한다. 사면의 지반조사 및 설계정수 산정기법 개발연구(한국건설기술연구원, 2000)에서는 산지사면에 분포하는 잔적토층의 지반조사를 위해 시료채취기를 개발하여 설계정수 산정기법 개발과 공학적 특성을 규명하고자 하였다. 그러나 이러한 실내실험을 통한 정수의 산정뿐만 아

나라, 현장 모니터링을 통하여 수리·수문학적 거동을 지속적으로 관측해야 한다. 또한, 장·단기적인 예측을 위해서는 모니터링을 통하여 실제 산지에서의 산사태를 유발하는 발생기작에 대한 연구가 수행되어야 하며, 이를 위하여 지반조사(시추 및 물리탐사) 및 현장 모니터링을 통해 지속적인 자료 수집을 통한 산사태 발생기구를 규명하는 연구가 필요하다. 광역적 산사태 위험성 평가연구는 최악의 조건에 대한 산사태 파괴뿐만 아니라, 산지에 대한 변경 및 환경의 변화에 따른 장기적인 안정성 변화에 대한 고려가 필요하다.

4) 사면안정해석모형

기존 절취사면 및 성토사면에 대한 사면안정성 연구에서는 침투, 강도특성 등에 대한 연구가 수행되었으나, 자연사면에 대한 연구는 통계적 기법연구 이외에 거의 수행되지 않았다. 최근에서야 자연사면을 무한사면으로 가정하고, 사면침투 및 안정성 평가 연구가 시작되는 등 아직 연구가 부족한 실정이다. 산사태는 지형, 지질, 기상, 지반 등 많은 요인들이 복합적으로 작용하여 발생하므로 단순한 무한사면모형 혹은 수리·수문모형을 적용하기 보다는 실제 기작을 반영할 수 있는 사면안정평가가 이루어져야 한다.

5) 지형인자 영향

지형인자는 표고, 경사, 방향, 경사길이, 경사위치, 굴곡도 등이 있으나, 기존의 연구에서는 대부분 경사도에 초점을 두고, 지리정보시스템에서 격자단위의 평균경사를 이용하여 평형사면해석을 수행하여 위험성을 평가하는 수준에 머물렀다. 사면의 형상을 고려하기 위한 시도에서 상승사면, 평형사면, 하강사면, 복합사면으로 구분하고 각각을 점수화하는 시도가 있었으나, 복합사면을 한 가지 그룹으로 정의하고, 상승사면을 0으로 부여하는 등 실제와 잘 맞지 않는 부분도 있다. 그러므로 경사 및 굴곡, 길이 등 여러 인자를 고려할 수 있는 연구가 필요하다.

6) 토심추정 기법

토심은 사면안정해석에 있어서 매우 중요한 인자이다. 기존의 연구는 토양도의 유효 토심을 그대로 이용하는 연구가 대부분이었으며, 산림청 기준에서도 깊이에 따른 값의 차이는 있으나, 상대적이고 정량적인 값만 제시하고 있고, 더욱이 토심 추정에 대한 언급은 없다. 최근에는 표고별, 경사도별로 차등을 두는 등 토심을 고려하고자 하는 연구가 진행 중이다. 국외에서는 지형을 고려하여 토심을 적절하게 산정하고자 하는 연구가

시도되었다. 따라서 산지 사면의 합리적인 토심산정에 관한 연구는 매우 중요하다.

7) 함수상태

흙의 함수상태는 강우시 침투능에 따라 큰 영향을 미치게 된다. 지반의 초기 함수상태는 선행강우 및 수문순환에 따라 그 값이 많이 변하게 된다. 그러나 기존의 연구들에서는 강우시 침투능은 전혀 고려하지 않거나, 상수로 취급하는 경우가 대부분이었다.

8) 강우침투현상

강우의 침투에 의한 포화대의 형성 및 지하수위의 상승은 지반의 조건, 지형, 지질 등의 인자에 따라서 많이 좌우된다. 우리나라는 산지의 특성상 토심이 1-2m 정도이므로, 외국의 경우와 다른 수문거동을 보이게 된다. 자연사면에서 강우에 의한 침투현상은 소규모 실내실험으로만 연구되고 있으나, 실제 현장에서 현장 모니터링을 통하여 강우-침투 기작을 연구해야 할 필요가 있다.

9) 산지지반 강도특성

지금까지는 포화토 중심의 강도특성 연구가 주로 수행되어 왔다. 그러나 실제 자연계의 흙은 대부분 불포화토이며, 특히 사면안정해석에 있어서 불포화토의 거동특성은 매우 중요하다. 지금까지 국내에서도 불포화토의 강도특성 연구가 수행되었으나, 아직 국내 화강풍화토 및 대표적인 흙에 대한 기초자료가 부족한 실정이다.

10) 식생인자 영향

뿌리의 강도 보강효과에 대한 연구는 진행되었으나, 실제 사면안정성에 미치는 영향에 관한 연구는 부족한 실정이다.

11) 확률론적 접근법

지반조사의 한계로 인하여 광범위한 산지에서의 토질, 수문 정수들의 불확실성을 고려한 확률론적 파괴가능성 평가에 대한 보다 심도 있는 연구가 필요하다.

3. 앞으로의 전망

산지가 지닌 수자원함량, 수질정화기능, 대기정화기능, 휴양기능, 국토보전기능, 야생동물보호기능 등 공익적 기능의 경제, 사회적 가치는 실로 엄청나다고 할 수 있다. 광

역적인 산지재해 위험성 평가 연구는 토목공학, 지질학, 통계학, GIS에 근거한 광역적 재해평가기법을 개발하여 자연재해의 예방뿐만, 아니라 향후 장기적인 개발계획을 위한 자료로서 활용될 수 있다. 광역적 재해지도를 이용하여, 도시 및 농촌, 산지 개발에 따른 피해를 최소화 하고, 적지선정을 위하여 위험성을 예측하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서 산림에서의 예기치 못한 파괴를 줄이고, 예측을 통하여 사전에 조치를 취하는 것은 앞으로 전원공간(농촌)의 개발에 중요한 역할을 수행할 것으로 전망된다.

자연사면 재해예지 시스템은 크게 다음의 두 가지 분야에 적극 활용될 수 있다.

- 국토개발계획 및 지역개발정책에 활용
 - 도로, 철도를 위한 절·성토계획, 산업입지 선정, 산지개발, 택지개발, 토양 형질변경 등이 요구되는 곳은 물론 자연재해에 대한 정책적 판단이 필요한 곳에 판단근거로 활용가능
- 재해예방대책에 활용
 - 국립공원, 삼림지역, 산촌마을 등 가꾸고 보전해야하는 중요한 산림에 대한 환경보전 및 재해예방대책에 활용

4. 기술도입의 타당성

우리나라는 전 국토의 75%가 산지로 구성되어 있고 산지는 장년기 지형으로서, 가파르고, 표토층의 두께가 얇은 특징을 가지고 있으며, 기후적으로도 여름철에 강우가 집중되는 특징을 갖고 있는 등 외국의 자연재해, 즉 미국의 강설에 의한 피해, 일본의 지진에 의한 피해와는 다른 특징을 보이며, 유럽의 지형 및 기후와도 다른 특성을 갖고 있다. 따라서 국외의 연구사례를 그대로 답습하기보다는 국내 지형, 지질, 기후 및 임상 등의 특성에 맞는 모형의 개발이 요구된다. 특히 우리나라의 기후특성 및 수리, 수문현상을 고려한 모형의 개발이 필요하며, 국내의 실제 산지 지형에 적합한 산사태 유발기구의 규명이 필요하다.

국내의 연구로는 산림청에서 제작한 산사태 위험지 판정표와 산사태 위험성 판정 프로그램 개발 연구가 있다. 판정표는 인자들에 대한 정성적이고 불완전한 분류라는 단점을 지니고 있으며, 프로그램 개발 연구에서는 그 판정표를 이용하여 위험성을 평가하여 근본적인 단점을 갖고 있다. 또한 이 연구에서는 강우 및 수리·수문현상을 고려하지 않으므로 장래의 변화에 따른 위험성을 예측하기가 대단히 곤란하며, 일회적인 평가에

그치고 있어 실제 적용성이 떨어지는 문제가 있다. 기존의 통계적 기법 연구는 광역적인 범위에 대한 재해평가기법으로 정성적이며, 개략적인 평가를 할 수 밖에 없다.

위험지역에 대한 보다 정밀한 예측을 위해서는 지속적인 모니터링과 장·단기적인 예측이 필요하므로 이를 적용할 수 있는 기법을 개발하는 것이 바람직하다. 역학적 기법은 이러한 문제를 해결할 수 있으며, 사면파괴 기작을 잘 설명할 수 있고, 산사태 위험지 판정표의 이론적 근거자료를 제공할 수 있으며, 모든 지역에 보편타당하게 적용이 가능하다. 그러므로 새로운 방법론을 이용한 자연사면 재해 위험성 평가 기법의 개발이 요구된다.

제 3 절 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구개발 내용

가. 연구개발의 내용

1) 현장 모니터링 및 자연사면 수리, 수문특성 분석

- 자연사면 붕괴 발생현황, 특성 등 조사
- 지하수위, 간극수압, 함수상태 등 조사 및 샘플채취
- 증발산량, 강우에 의한 침투, 유출량 조사

2) 유발인자 영향 규명(식생, 토질, 지형)

- 식생인자
 - 뿌리효과규명(수리·수문학적, 역학적)
 - 식물효과규명(수리·수문학적, 역학적)
- 토질인자
 - 수리, 수문현상에 의한 자연사면의 함수특성, 강도특성
 - 자연사면 강우침투 특성(모형실험, 수치해석)
- 지형인자
 - 지형인자의 정의 및 지형분류
 - 지형인자에 따른 토심산정

3) 지형패턴 분석을 통한 자연사면 위험성 해석 기법 개발

- 사면형상 추출
 - 지형자료 구축 및 단위셀 별 사면경사, 표고, 경사위치, 향, 곡률 산정
 - 능선 및 계곡의 추출
 - 파괴가능 사면형상 추출
- 사면형태에 대한 패턴 분류
 - 사면의 기본형에 대한 사면패턴 분류
 - 추출사면에 대한 사면패턴 분류
- 사면패턴별 사면안정성 평가
 - 사면패턴별 사면안정성 평가
 - GIS 맵을 이용한 사면위험성 도시

4) 사면안정성 평가 프로그램 개발

- GIS/DB 설계 및 자료구축
 - 수치지형도, 토양도, 지질도, 임상도 및 기타 자료 수집
- 역학적 기법에 의한 사면안정성 평가 시스템 개발
 - 사면안정모형 및 수리·수문 모형을 이용한 평가시스템 개발
- 현장 적용을 위한 업무용 프로그램 개발
 - 실무적용을 위한 ArcView 환경 프로그램 개발

5) 재해 예측지역에 대한 대안제시

- 기상, 토질, 식생 및 지질 자료획득 및 관리방안 제시
- 재해 예측지역에 대한 대안 및 대책공법 제시

나. 연차별 연구개발 목표와 내용

구분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
1차 년도 (2004)	○ 발생현황 조사 및 대상지 선정 (주관기관)	○ 국내 발생현황 - 발생현황 문헌조사 - 규모 및 특성 현장조사 - 항공 및 위성영상에 의한 현황 파악 ○ 계측기기 설치 및 현장 모니터링 - 연구 대상지 선정 - 계측기기 매설 - 현장 모니터링을 통한 자료조사 - 현장 지층분석을 위한 지반조사 실시 (물리탐사)
	○ 토질인자 영향 분석 (협동기관)	○ 수문현상에 의한 자연사면 거동분석 - 자연사면 거동에 대한 이론 연구 - 자연사면 함수, 역학특성 분석
	○ 사면형상 추출 및 지형패턴 분석 (주관기관)	○ 파괴가능 사면의 사면형상 추출 - 단위 셀을 이용한 지형요소 분석 - 파괴가능 사면의 추출 ○ 패턴분류에 의한 사면형상 분류 - 사면 기본형 패턴 분류 - 추출 사면의 패턴 분류
	○ 지리정보시스템의 설계 및 자료구축 (주관기관)	○ GIS/DB 설계 및 자료구축 - 수치지형도 구축 - 토양도 구축 - 지질도 구축 - 구축 - DB 설계

구분	연구개발목표	연구개발 내용 및 범위
2차 년도 (2005)	○ 현장 모니터링 및 지형 및 지질 분석 (주관기관)	○ 지속적인 현장 모니터링 - 지하수위, 간극수압 모니터링 - 증발산량, 강우 침투 모니터링 - 유출특성 모니터링 ○ 지형 및 지질분석 - 물리탐사 및 지반조사 - 물성시험
	○ 토질, 지형인자 영향 규명 (협동기관)	○ 사면 침투 특성 조사 - 자연사면에 대한 침투, 투수특성 조사 - 현장 모니터링에 의한 침투특성 조사 ○ 지형인자 영향 규명 - 지형 형태에 따른 사면분류 - 지형인자를 이용한 토심추정 기법 연구
	○ 사면패턴별 사면 안정성 평가(주관기관)	○ 사면패턴별 안정성 평가 - 추출사면의 안정성 평가 - GIS 맵을 이용한 사면위험성 도시
	○ 위험성 평가 시스템 구축 (주관기관)	○ 사면안정성 평가 시스템 구축 - 사면안정 모형, 수문모형의 통합 - 산사태 위험성 평가 시스템 구축

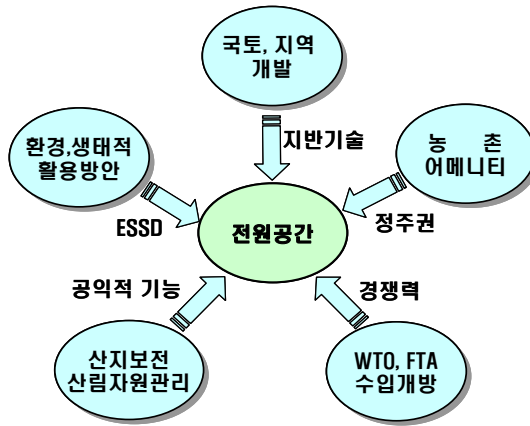
구분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
3차 년도 (2006)	○ 현장 모니터링 및 실험 결과 자료 구축 (주관기관)	○ 현장 모니터링 및 현장실험 결과 정리 - 모니터링 결과 자료구축 : 강우 침투특성 : 식생에 의한 차단효과 : 지하수 흐름 : 강우 유출특성
	○ 식생인자 영향 조사 (협동기관)	○ 뿌리 보강효과 조사 - 뿌리 형태별 보강효과 규명 - 뿌리에 의한 침투 특성 - 뿌리에 의한 유출 특성 ○ 식물인자 영향 조사 - 식물에 의한 침투특성 - 식물에 의한 유출특성
	○ 위험성 평가 시스템 적용 및 검증 (주관기관)	○ 사면안정성 평가 시스템 적용성 검증 - 평가 시스템의 현장 적용 - 평가 시스템의 검증
	○ 실무 프로그램 개발 및 적용성 평가 (주관기관)	○ 현장 적용을 위한 실무용 프로그램 개발 - ArcView 환경 프로그램 개발 - 소유역의 지역별 특성 적용 - 실측 데이터 사용 - 사용자 매뉴얼 작성 ○ 프로그램 적용성 평가 - 자료관리의 효율성 평가 및 관리방안 제시 - 여러 시나리오에 대한 시·공간적 위험성 예측 가능성 평가
	○ 재해 예측지역에 대한 대안·대책공법 제시 (주관기관)	○ 재해 예측지역에 대한 대안·대책공법 제시 - 국·내외 대책공법 사례조사 - 대책공법 제시

3. 연구개발 방법 및 설계

가. 연구개발 방법

1) 연구의 위치

본 연구는 국토의 대부분을 차지하는 전원공간(농촌)의 자연 및 경관자원의 보전을 통해 농촌 어메니티 가치를 향상시키는데 의의가 있다. 또한 WTO, FTA 및 농촌의 어려운 현실을 타개하기 위한 자연과 환경을 바탕으로 하는 농촌 관광자원의 개발 및 보전을 위한 정보제공 역할을 수행하고자 한다.



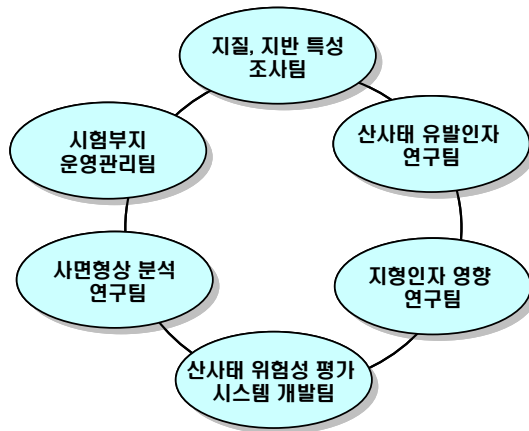
<연구의 위치>

2) 연구기관 및 연구팀의 구성

가) 연구기관

- 서울대학교 : 현장조사 및 모니터링, GIS 시스템 개발
- 충북대학교 : 유발인자 영향 규명(실험 및 수치해석)

나) 연구팀



<팀별 연구체계>

3) 연구개발 설계

- 연구개발의 기본 방법으로 세부과제별로 각 과제별 독립성을 유지하면서 연구를

진행하고 전체적으로 유기적인 하나의 연구체계를 확립하도록 한다.

- 세부과제별로 보면, 소유역 내 산지의 지반조사 및 현장 모니터링을 바탕으로 수문·수리적 특성을 파악한다.
- 토질 및 식생인자의 사면안정에 미치는 영향을 실내실험, 모형실험 및 수치해석을 통하여 분석하고, 적절한 모델개발을 하여, 사면안정성해석을 수행하기 위한 자료를 제공한다.
- 지형패턴분석을 통하여 자연사면의 형태를 반영할 수 있는 다중셀 기반의 사면안정성 해석 기법을 개발하며, 보다 실제적인 평가가 되도록 한다.
- 지리정보시스템을 이용하여 광역적 산사태 위험성을 평가하고, 실무적용을 위한 프로그램을 개발한다.

나. 세부과제별 연구 설계

1) 현장 모니터링 및 자연사면 수리, 수문특성 분석

가) 자연사면 붕괴 발생현황, 특성 등 조사

- 지형, 지질, 식생, 지반 조건의 특성에 따른 발생특성 및 규모를 조사한다.
- 조사결과를 바탕으로 산사태 유발인자에 따른 특성을 추후 연구자료로 활용한다.

나) 지하수위, 간극수압, 함수상태 등 조사 및 샘플채취

- 현장 모니터링을 통하여 강우 및 기상변화에 의한 지하수위 변동, 간극수압, 함수상태 등을 조사한다.
- 증발산량, 강우에 의한 침투 및 유출량 조사를 통하여 침투해석을 위한 자료로 활용한다.

2) 유발인자 영향 규명(식생, 토질, 지형)

식생, 토질, 지형인자의 영향을 규명하기 위하여 실험 및 수치해석을 통하여 특성을 규명한다.

가) 식생인자

- 뿌리 및 식물부의 사면보강효과를 실험 및 수치해석을 통하여 규명한다.
- 식생인자의 보강기작을 규명하고, 모형을 개발한다.

나) 토질인자

- 불포화토 함수특성, 강도특성을 분석하여, 국내 화강풍화토의 기초자료로 활용한다.

- 불포화토 자연사면 강우침투 특성을 모형실험과, 수치해석으로 분석한다.

다) 지형인자

- 지형인자의 정의 및 지형분류를 수행하여, 사면의 경사, 위치, 형태를 분류한다.
- 풍화, 퇴적, 침식작용과 지형인자를 이용하여 토심을 산정한다.

3) 사면 형상분석을 통한 자연사면 위험성 해석 기법 개발

사면형상을 분류하고 그룹별 사면안정성을 평가한다.

가) 사면형상 추출

- 단위셀 별 사면경사, 표고, 경사위치, 향, 곡률 등을 산정한다.
- 지형요소 및 파괴가능 사면형상을 추출한다.

나) 사면형태에 대한 패턴 분류

- 사면의 기본형에 대한 사면패턴을 분류한다.
- 추출사면에 대한 사면패턴을 분류한다.

다) 사면패턴별 사면안정성 평가

- 사면패턴별 사면안정성을 평가한다.
- GIS 맵을 이용한 사면위험성을 도시한다.

4) 사면안정성 평가 프로그램 개발

자연사면 재해 위험성 평가 시스템을 개발한다.

가) GIS/DB 설계 및 자료구축

- 수치지형도, 토양도, 지질도, 임상도 및 기타 자료를 수집하고, 자료를 구축한다.

나) 역학적 기법에 의한 사면안정성 평가 시스템 개발

- 사면안정모형 및 수리·수문 모형을 이용한 평가시스템 개발
- 평가시스템의 적용성 검증

다) 현장 적용을 위한 업무용 프로그램 개발

- 실무적용을 위한 ArcView 환경 프로그램을 개발한다.

5) 재해 예측지역에 대한 대안·대책 제시

재해 예측지역에 대하여 대안·대책공법을 제시한다.

- 국·내외의 대안·대책공법을 조사
- 재해 예측지역에 대한 대안·대책공법 제시

제 2 장 국내외 연구 현황

제 1 절 국내 연구 현황

우리나라의 산사태 재해는 매년 장마 또는 집중호우, 태풍이 있을 때 마다 반복되었으며 피해액도 점차 증가하고 있으나 산사태에 대한 국내 정책은 긴급 복구위주로 이루어져 왔다. 한편 사전 예방에 대한 의식이 높아지고 계측기술의 발달함에 따라 사전 예방에 대한 연구의 필요성이 늘어나고 있다.

80년대 말 통계적 기법을 이용한 산사태 예측 연구가 주로 이루어졌다. 김윤종 등(1989)은 Isopleth Mapping 기법을 이용하여 산사태의 분포와 발생빈도를 등치선의 형태로 표현하여 산사태의 활동성과 지형 및 경사에 따른 사방사업의 필요성을 제시하였다.

통계적 기법을 이용한 산사태 예측을 위해서는 산사태 자료(발생일시, 위치, 강우량 등)의 정확한 기록 및 보존, 산사태 발생지역 및 예상지역에 대한 정밀조사의 지속적 시행, 산사태 기초연구의 수행 등이 필요하다. 그리고 산사태는 강우, 지질, 지형, 토질 등 여러 인자들의 복합적인 조합에 의해서 발생하는 것으로 알려져 있고 어느 하나만으로 발생한다고 보기는 어려우므로 이런 복합적인 인자들의 계산과 현장 조사를 통해 얻는 자료를 데이터베이스화하는 것이 중요하며 많은 데이터를 효율적인 관리하고 적용하기 위하여 GIS의 이용을 강조하였다(구호본, 구재동, 1995). GIS는 다양한 정보의 통합활용 및 여러 가지 분석 기능을 제공하므로 시뮬레이션을 통한 대안의 설정 및 평가가 가능하고 GIS를 공간의사결정 지원 시스템으로 활용하려는 노력이 시도되어 인공 지능이나 전문가 시스템 기법을 활용한 문제해결 도구로까지 그 응용이 확산되고 있다. 많은 양의 공간정보를 관리, 분석하는데 있어 효과적인 GIS의 기능을 이용한다면 산사태와 같은 재해정보시스템의 목적으로 적합할 것으로 평가되었다(이진덕, 2002).

1996년 서천 및 보령지역 및 주변 지역들에 대하여 항공사진으로부터 추출되는 산사태 발생지역과 규모들에 대한 정량적인 분석접근이 이루어졌다. GIS를 이용하여 등치선작도기법으로 도시 및 주변 지역들에 대한 산사태 활동성 분석을 수행하였다. 또한 GIS는 산사태 발생에 영향을 미치는 환경지질학적 요소(지형, 지질, 토양 등)들을 통일된 시스템 하에서 정량적으로 분석할 수 있게 하였으며, 다양한 지도모형연구에 의한

자료처리를 수행할 수 있게 하였다(김윤중, 1996).

이수곤(1999)은 부산지역에 대하여 GIS를 이용한 산사태 위험성 파악하였다. 이 연구에서는 산사태 유발 인자 중 일부만을 이용하여 추가적 연구의 필요성을 피력하였다. 또 용인지역에 대하여 항공사진을 이용한 산사태 발생 데이터베이스를 구축하였고 확률통계 인공신경망 기법을 이용하여 산사태 위험도를 파악하였다(이사로 등, 2000). 이 시스템은 Internet으로 구축되어 활용되었다. 이진덕(2002)은 구미시에 대한 산사태 위험도를 파악하기위해 수치고도모형을 통하여 경사도, 사면방향도를 추출하였고 위성영상을 통하여 정규식생지수(NVDI)와 피복상황을 파악하여 GIS를 이용 종합적으로 산사태 위험성을 파악하였다. 이사로는 울산지역을 연구하였다. 지형, 토양, 식생, 토지이용, 지질구조 등을 GIS를 이용 공간 데이터베이스를 구축하여 산사태 위험을 파악하려 하였다.

국내의 연구는 통합적인 계산을 빠르게 수행할 수 있다는 GIS의 장점을 이용하여 과거 산사태에 대한 데이터베이스의 형성을 통한 통계적인 방법으로 접근하는 것이 대다수였다. 산림청이 현재 산사태 위험지를 판정하고 관리하는 기준 또한 통계적인 방법을 따르고 있다. 확률 통계적인 방법은 산사태 관련자료가 보다 많이 집약될수록 위험지의 판정에 유용한 도구라고 평가받아 왔다. 하지만 통계적인 방법은 지역의 한정성과 많은 데이터의 필요성이라는 단점을 가지고 있다. 이에 대하여 산사태 발생의 기작을 바탕으로 지형분석을 통하여 산지사면의 포화대를 찾아내고, 이러한 포화대를 산사태 위험지역으로 판정하는 물리적 접근법에 대하여 연구가 진행되고 있다. 새로이 제안된 이 물리적 접근법에 대하여 경기 북부 지역에 대한 연구를 하였고, 산사태 위험도를 판정하였다(김재수 등, 2000).

이후 초반의 데이터베이스의 활용과 확률, 통계적 분석이라는 측면에서의 GIS의 활용을 벗어나 역학적 기법을 이용한 광역적 산사태의 종합적 분석이라는 용도로 GIS의 이용이 나타난다.

김홍택(2001) 등은 무한사면에 대한 사면안정해석을 토석류 해석에 적용하였고 GIS 기법을 이용하여 지형정보를 추출해내고 그 값을 이용하여 광범위한 제주도 지역 전체에 대한 토석류 발생 위험도를 평가하였다. 또한 같은 방법을 이용하여 충남 보은 지역에 대한 연구도 이루어졌다(김홍택 등, 2001). 하지만 역학적 기법을 적용하기에는 너무 큰 범위를 다루고 있어 실효성이 떨어진다는 문제가 있다.

지금까지 국내에서 이루어진 연구는 외국의 연구들을 그대로 따르고 있으며 산지의 지형, 지질, 수문, 지반 등의 유발인자들의 변화에 대한 고려가 미흡하고, 적용범위에 대한 언급이 없는 실정이어서 더 많은 연구가 필요하다.

제 2 절 국외 연구 현황

산사태의 연구에는 위험지역 산정과 산정된 지역에 대한 감시 두 가지가 있다. 국외에서는 국내와 같은 빠른 흐름성 산사태뿐만 아니라 점진적인 대규모 산사태의 발생으로 인하여 위험지 예측과 동시에 선정지의 감시에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

산사태 예측에 대한 연구는 통계적 기법과 역학적 기법으로 나뉜다. 통계적 기법은 산사태 발생지와 각종 환경·지질 토질 인자들과의 상관관계에 의하여 발생가능성을 추정하는 기법으로 70년대부터 사용되어 왔다. 그 후 GIS의 발달로 인하여 산사태 자료에 대한 데이터베이스화가 이루어지고 그것으로 산사태를 예측하려는 시도가 있었다. 하지만 통계적 기법을 적용성의 문제로 인하여 회의적으로 판단된다.

산사태에 대한 체계적 접근 필요성의 확대로 1980년대부터 역학적 기법에 의한 연구가 있었다. 역학적 기법은 물리·역학에 기반을 둔 방법으로 각종 지형, 지질, 토질, 기상 등의 산사태 유발인자들을 수문모형과 사면안정 모형에 적용하여 안전율과 파괴확률을 산정하는 방법이다.

역학적 기법을 대표하는 방법 중 하나는 수문모형을 통한 산사태 위험 예측이다. 산사태에 대한 수문학적 접근은 지하수위가 사면안정에 미치는 영향에 대한 연구를 시작으로 유한요소를 이용하여 그 흐름을 해석하였고 수문모형만의 해석을 벗어나 강우와 지형인자에 따른 수문-지형학적 연구로 사면안정을 해석하려는 시도가 있었다. CO_2 의 증가에 따른 지구 온난화 현상으로 자연재해가 많이 발생하고 수해의 피해가 커짐에 따라 수문학적 기반을 둔 산사태 위험 파악에 대한 연구가 증가하고 연구가 진행되면서 수많은 수문 모델이 만들어 졌다.

흙의 강도 개념으로 사면안정을 해석하는 방법도 있다. 흙의 점착력과 파괴각으로 사면파괴를 설명하려 하였고 수문학적 접근과 강도 접근법을 함께 적용하는 흙의 강도와 지하수위 상승으로 인한 간극수압의 상승에 대한 영향으로 사면 파괴를 해석하였다.

최근 역학적인 방법에 대한 GIS 활용의 연구가 이루어지고 있다. 여러 자료의 통합과 복잡한 계산을 통괄적으로 처리할 수 있다는 점과 이루어진 계산을 가시적으로 표현할 수 있다는 GIS의 장점으로 인하여 역학적 기법이 통합되었고 현재의 연구는 이것을 중심으로 이루어지고 있다. 연구의 진행으로 더 많은 인자들을 고려할 수 있게 되었고 다양한 사면에 대한 적용성이 커졌다.

각 국가마다 여러 발생 인자의 차이점으로 인하여 규모 및 성격이 다른 산사태가 발

생하기 때문에 자국만의 연구가 이루어졌다. 홍콩의 경우 단기 폭우에 의한 빠른 흐름성 산사태가 많이 발생하기 때문에 강우강도에 따른 산사태 발생에 대한 연구가 많이 이루어졌고 토석류의 흐름이 어디까지 분포할 것인가에 대한 예측 연구가 단계적으로 이루어졌다. 초기 연구는 경험적으로 쌓인 자료로 확률 통계적방법을 이용하여 토석류의 흐름을 예측하였고 그 후 실험실에서의 실험을 통한 예측을 하였다. 현재는 무한사면에 적용 가능한 역학적 기법으로 토석류의 흐름을 해석하려는 연구가 이루어지고 있다.

유럽의 경우는 유럽 전체적 연구가 이루어지고 있다. 과거 지구 온난화에 따른 수해의 증가로 유럽지역에 대한 강우에 따른 산사태 예측의 연구가 이루어졌다. 현재는 RUNOUT이라는 계획아래 예민한 예측 시스템의 개발, 감시 네트워크를 가진 GIS 기반의 산사태 위험지 파악을 목적으로 연구가 이루어지고 있다.

위험지 감시의 연구는 변위 변화 파악으로 점진성 산사태를 예측한다. 초기 EDM을 이용하여 변위를 측정하고 변위 변화에 따라 그 지역의 위험성을 파악하였다. 그 후 GPS의 이용으로 정확한 위치정보 인식에 따라 변위 차이에 의한 감시 체제의 실용성이 커지게 되었다. 현재 연구는 원격탐사를 이용하여 산사태 현황 파악과 예측에 대하여 이루어지고 있다. 원격탐사는 현장계측 없이 컴퓨터 분석으로 많은 정보를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 작은 규모의 산사태 경우 그 감시가 쉽지 않고 산사태 발생지역에 대한 파악도 어려운 단점이 있지만 그 편리성으로 인하여 연구범위가 확대되고 있다.

제 3 장 산사태 특성 및 발생 현황 연구

제 1 절 서론

우리나라는 강우가 여름철에 집중되어 있고 국토의 70%이상이 산지로 이루어져 있어 상대적으로 산사태 발생 빈도가 높다. 1976년 이후 산사태로 인한 피해는 연평균 피해면적 400ha, 인명피해 36명, 복구비용 206억원으로 자연재해 인명피해의 1/3에 달하고 있다. 피해면적의 경우 1980년대 230ha에서 1990년대 349.5ha, 최근(2000~2006) 975.1ha로 증가하는 추세에 있다. 인명피해의 경우 산지주거율 감소로 인하여 36.5명에서 10.9명으로 점차 줄어들고 있지만 2002년도 태풍과 집중호우로 인한 산사태로 35명의 인명사태가 발생하는 등 그 피해는 막대하다. 또한 최근 기상이변으로 인한 국지성 집중호우가 발생하여 안정 지역이라 판단되었던 지역의 산사태 발생 가능성이 커지고 있으며, 발생하는 산사태의 규모가 대형화되고 있어 그 예측과 경감에 대한 연구에 대한 필요성이 대두되고 있다. 산사태는 지질, 지형, 기후, 토질 등 여러 가지 요인에 의하여 복합적으로 발생하고 그에 따라 발생하는 산사태의 형태가 달라지기 때문에 산사태에 관한 연구의 진행에 있어 산사태의 전반적 이해가 요구된다.

따라서 본 장에서는 산사태 연구의 기본으로서 산사태를 정의하고 각 국가 및 연구분야별로 나누어져 있는 분류에 관하여 알아본다. 또한 일반적인 산사태 발생 원인으로 알려져 있는 내·외적요인, 자연적·인위적 요인으로 구분하여 강우, 하천·해안의 침식 및 지진, 산불, 지질, 지형과 토질, 식생이 산사태에 미치는 영향을 분석하고 이로 인하여 발생한 국내외 산사태 발생 현황을 살펴본다.

제 2 절 산사태 특성연구

1. 산사태의 정의

산사태의 사전적 의미는 지진이나 큰 비 등으로, 산 중턱에 있는 암석이나 토사 따위가 갑자기 무너져 내리는 현상이라 한다.

Terzaghi(1950)는 산사태를 사면을 구성하는 물질의 이동 또는 활동(滑動)을 뜻하는 landslide(영국에서는 landslope)라 하고, 감지할 수 없을 정도의 느린 이동을 creep(포행)으로 정의했다.

Skempton and Hutchinson(1969)은 “landslide”란 활동체의 경계에서 생긴 전단파괴(剪斷破壞)의 결과로 흙덩이 또는 돌덩이가 비탈 아래로 내려오는 것이라고 정의한 바 있다. Varnes(1978)는 활동(滑動)만을 의미하는 landslide와 기타 활동으로 분류될 수 없는 지반변위 즉 포행을 합쳐서 slope movement란 말을 쓰고 있다.

지형학에서는 넓은 의미로 산사태를 mass movement(mass wasting)의 일종으로 이는 중력 작용에 의한 지표구성물질의 이동을 뜻한다.

산사태는 배사구조, 유반구조(dip slope structure), 돛구조, cap-rock 구조 등에서 발생하기 쉽고 붕적토(colluvial deposit)와 기반암(bedrock)의 경계, 풍화암과 미풍화암의 경계, 층리면과 단층면이 활동면(滑動面)으로 되는 경우가 많다.

일본 학자들은 지반붕괴현상을 landslide와 slope failure 등으로 나눈다.(Sassa, 1985)

우리가 접하는 대부분의 산사태는 slope movement중 debris flows(토석류), debris avalanches, rock slides, mud slides등 학술적으로 속도가 비교적 빠른 사면 활동으로 사용함이 타당하고 토질공학에서 사면파괴라고 사용하는 의미도 동일하게 쓰여진다고 볼 수 있다.

2. 산사태의 분류

산사태 유형 분류는 산사태 발생 요인이 인자인식의 정도차이에 따라 나라별, 학자별로 달리하고 있다. 여기서는 Varnes의 분류법과 여러 나라들의 분류법에 대하여 알아본다.

가. Varnes 분류법

Varnes(1958)는 운동 형태와 사면의 구성물질을 상호 연관시켜 사면 활동 유형을 fall, topple, slide, lateral spread, flow, complex로 분류하였는데 각 유형별 이동속도의 개념이 내포되어 있어 구분 및 학술적 개연성이 높아 세계 공용으로 쓰는 분류이다. 각각의 특징은 표 3.1에 정리하였다.

각각의 유형에 따른 원리와 설명은 다음과 같다.

표 3.1 Varnes의 산사태 유형구분

산사태 유형			이동물질		
			암석	공학적인 토양	
				대부분 조립질	대부분 세립질
Falls			Rock fall	Debris fall	Earth fall
Topples			Rock topple	Debris topple	Earth topple
Slide	Rotational	Few unit	Rock slump	Debris slump	Earth slump
	Translational	Many unit	Rock block slide	Debris block slide	Earth block slide
Rock slide			Debris slide	Earth slide	
Lateral spreads			Rock spread	Debris spread	Earth spread
Flows			Rock spread (Deep creep)	Debris flow	Earth flow (Soil creep)
Complex			2개 혹은 그 이상의 산사태 유형이 혼합되어 발생		

※ unit은 변형되지 않은 이동 토괴(Moving mass)의 수를 말함

1) Slide

포화되지 않았거나 압밀되지 않은 물질 혹은 암석이 오랜 기간 동안 풍화작용을 받아 급속한 속도로 연약면과 평행한 방향으로 미끄러지면서 흘러내리는 현상이다. 이때 이동 물질은 유동 중에 심하게 손상되거나 조각조각 부서진다. 이런 파편들로 인해서 추가적인 피해가 발생하는 것이 특징이다.

slide는 파괴면과 크게 발달된 전단면형에 의해 주로 발생하는 흙 또는 암괴의 하부 이동으로 활동면의 형상에 따라 활동면이 원호에 가까운 rotational slide와 직선에 가까운 translation slide으로 나누어진다. Varnes는 회전활동의 경우 소규모 사면붕괴에

서 많이 발견되며 대규모 slide의 경우에는 translation slide가 더 많이 나타난다고 하였다. 초기에는 원지반에 균열이 발생하는 정도로 시작되며, slide가 진전되면서 잠재적인 파괴면을 따라 변위가 일어나게 된다. 마지막 단계에서는 붕괴가 발생된 부분을 따라 원지반과 파괴면 사이에 뚜렷한 분리가 나타나게 된다. 그림 3.1은 Slide의 원리를 그림으로 표현한 것이다.

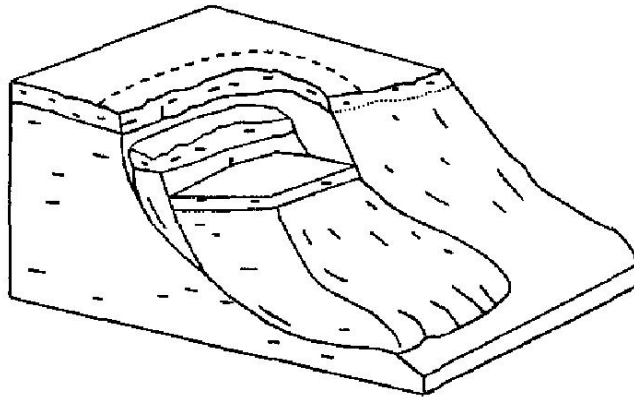


그림 3.1 산사태 유형(slide)(국립 방재연구소, 2000)

2) Flow

flow는 그 전단면상 공간적으로 연속적인 운동으로 점성이 높은 포화된 물질이 흘러 내리는 현상이다. 일반적으로 slump보다 빠른 속도로 발생한다. 전단면은 극히 단시간에 발생하고, 매우 협소하게 유지된다. 변위발생 토괴가 가지는 속도의 분포는 점성액체의 거동과 유사하다. 진흙처럼 점성이 크기 때문에 돌덩어리나 나무 혹은 자동차를 움직일 정도이다. 그림 3.2는 flow의 원리적 그림이다.

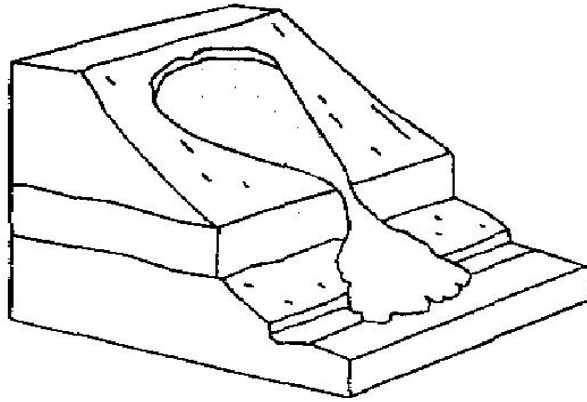


그림 3.2 산사태 유형(flow)(국립 방재연구소, 2000)

3) Fall

낙하는 전단면위가 거의 발새하지 않은 상태에서 급한 경사면의 흙이나 암석이 분리되는 것을 시작으로 주로 탈락, 변형 또는 회전에 의해 하부로 자유낙하하는 것을 지칭한다. 낙하는 발생 시 매우 빠른 속도를 보이며 다른 사면 붕괴보다 먼저 발생하는 경우가 많다. 낙하하는 물질에 따라 낙반, 낙석, 토사 낙하로 세분할 수 있다. 그림 3.3은 fall의 원리적 그림을 나타내고 있다.

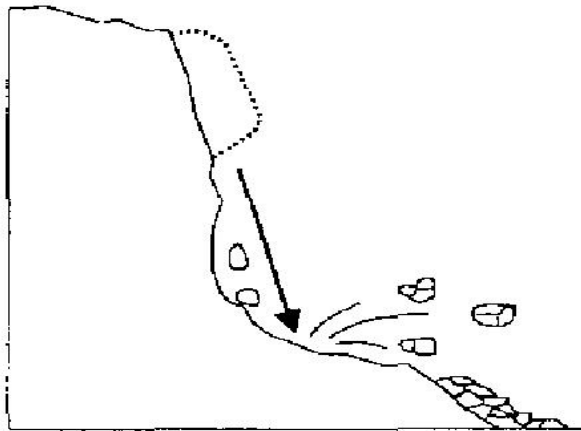


그림 3.3 산사태 유형(fall)(국립 방재연구소, 2000)

4) Topple

topple은 중심아래의 점 또는 축에 대한 휨 또는 암괴로 구성된 사면의 전방회전으로 주로 중력에 의해 발생한다. 사면상부에 인장균열 등이 존재하여 물이 침투한 경우, 변위를 촉진시키는 요인이 될 수도 있다. 물질 상으로는 암반의 경우가 가장 많은 가능성을 내재하고 있으나, 경화된 토사의 경우에도 발생이 가능하다. 대부분의 암석이 현무암으로 이루어진 제주도에서는 주상절리가 전도 파괴되는 양상을 보인다. 이 유형에 대한 원리는 그림 3.4에서 보여주고 있다.

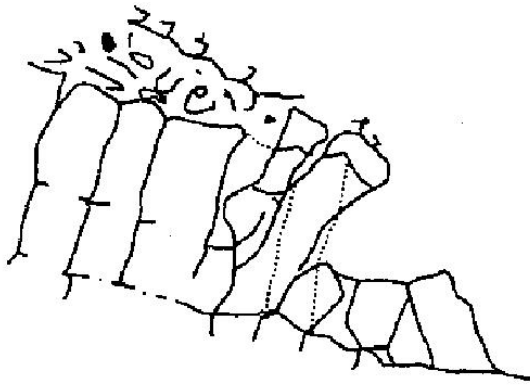


그림 3.4 산사태 유형(topple)(국립 방재연구소, 2000)

5) Lateral spread

lateral spread는 연약하부 물질에 포함되어 있는 점착물질의 균열부분의 일반적인 침전과 결합된 점착력을 가지고 있다. 토괴나 암괴의 연장이다. 균열표면은 대규모의 전단이 발생하지는 않는다. 퍼짐은 연약물질의 흐름 또는 분출시 나타나는 액화현상에 의해 발생하게 될 수도 있다. lateral spread는 지진으로 유발되는 동적하중으로 인해 발생하는 액상화 현상으로도 발생이 가능하다. lateral spread는 토층의 깊이가 얇은 세립토 경사면에서도 발달되는데, 특히 교란되었거나 또는 재성형된 상태에서 전단강도가 부분적으로 손실된 예민 실트나 예민 점토가 물을 함유한 경우에 자주 발생한다. 그림 3.5는 lateral spread의 원리적 그림을 나타낸다.

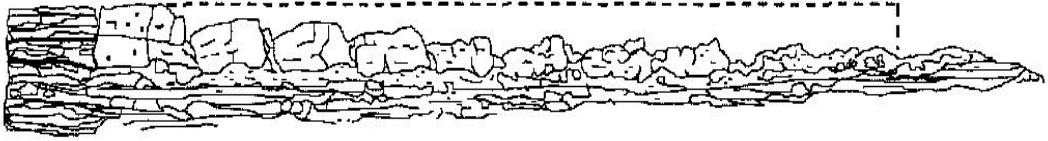


그림 3.5 산사태 유형(Lateral spread)(국립 방재연구소, 2000)

나. 국가별 분류법

1) 국내 분류법

우리나라는 산사태의 유형이 모암의 특성과 지형에 밀접한 관계가 있으며, 발생위치와 형태 및 외형 등에 따라 다음과 같이 구분된다.

가) 발생위치에 의한 구분

우리나라의 산사태는 산림청 자료에 따르면 발생위치와 경사도에 따라 다음과 같은 3가지 형태가 있다.

(1) 산복붕괴(山腹崩壞)

우리나라에서 발생하는 산사태 중 전체의 72%가 이에 해당되며, 대부분 지표면 또는 토질 단면상의 불연속면을 따라 발생한다. 특히 풍화토와 기반암의 접촉면을 따라 발생한다.

(2) 계안붕괴(溪岸崩壞)

계류의 중횡침식작용에 의하여 발생하는 산사태로 계안에서 발생하며, 우리나라에서 발생하는 산사태 중 전체의 9%가 이에 해당된다.

(3) 와지붕괴(窪地崩壞)

집수가 원인이 되어 발생하는 산사태로 산복과 계안사이의 토심이 비교적 깊은 와지에서 발생한다.

나) 외형에 의한 구분

우리나라에서 발생한 산사태는 산림청 자료에 따르면 외형에 따라 다음과 같은 4가지 유형이 있다.

(1) A형

지형이 복잡하고 유수가 모여드는 하강사면 및 평행사면의 산복유로에서 발생되며, 수지상의 산사태 발생유형이 이에 해당한다.

(2) B형

사면의 경사길이가 짧고 경사가 급한 사면이나 사면의 경사길이가 길고 변각점이 있는 사면(즉, 강우가 집중되는 오목한 형태의 사면)에서 발생되며, 계안에서 발생하는 여상, 설상, 안상과 와지붕괴의 패각상, 표자상의 산사태 발생유형이 이에 해당한다.

(3) C형

지형이 단순하며 유로가 비교적 좁고 사면의 경사길이가 긴 하강사면이나 평행사면의 유로면에서 발생하며, 선상의 사태발생유형이 이에 해당한다.

(4) D형

표토하부가 단단한 암반층이거나 불투수성 기반암층이 있는 지역에서 발생되며, 판상의 산사태 발생유형이 이에 해당한다.

2) 일본의 분류법

일본은 토사재해를 지활(地滑)과 산붕(山崩)으로 대별하고 있다. 학자마다 관점에 따라 세부분류를 하기도 한다. 몇몇의 학자들은 우리나라 산사태를 이 분류법으로 구분할 때 지활로 특정 짓기도 한다. 지활과 산붕의 차이점은 표 3.2에 정리하였다.

일본의 학자들 중 小出(1955)은 지질에 의한 지각 구분을 제 3기층 지각, 파쇄대 지각, 온천 지각으로 분류하였고 容口(1957)은 운동양식에 따라 원호형 지각, 평면형 지각, 포행형 지각으로 분류했으며, 高野(1960)은 형태에 따라 지괴(地塊)형 지각, 붕괴(崩壞)형 지각, 유동(流動)형 지각으로 구분하였다.

한 편 산붕의 분류는 붕적토의 붕괴, 표토의 붕괴, 대적토의 붕괴, 기반암의 붕괴로 구분되고 있다.

또한 발생 위치로 산복(山腹)붕괴, 와지(窪地)붕괴, 계안(繫岸)붕괴로 구분하기도 하고 산사태의 발생형태 즉 외형에 의하여 여상, 계상(楔狀), 안상(岸狀), 패각상(貝殼狀), 수지상(樹枝狀), 선상(線狀), 판상(板狀), 표자상(杓子狀) 등으로 구분하기도 하며 주 발생 원인으로 지상 및 지하구성물의 불연속성으로 구분하여 지표면상의 불연속성(경사

도의 불연속, 지표식생의 불연속 등)과 토양단면상의 불연속성(수직적으로 토양단면의 성질이 급격히 변화하는 층의 존재여부)에 따라서 구분하기도 한다.

표 3.2 지활(땅미끄러짐)과 산붕(땅무너짐)의 비교

구분	지활	산붕
지질	특정 지질(제3기층, 과쇄대)에서 많이 발생	특정 지질조건하에 한정하지 않음
토질	주로 점성토를 활동면으로 함	사질토(마사, 요나, 시라스)에서 많이 발생
지형	5~20°완경사지에 발생, 상부가 사다리꼴	20°이상의 급경사지에서 많이 발생
이동 속도	0.01mm/day~10mm/day 많음, 대개 속도 느림	10mm/day 이상으로 속도가 빠르고 급발성임
활동 상황	계속성, 재발성	급발성
토	교란이 작고 원형을 유지한 채 움직임	토피가 교란됨
유인	지하수에 의한 영향이 큼	강우강도의 영향이 큼
규모	이동면적이 크고 깊이도 수m 이상임	이동면적이 1ha이하가 많고, 깊이도 얇음
특징	발생전 균열이 있고, 함물, 용기, 지하수 변동 있음	징후의 발생이 작고 돌발적으로 활동함

3) 홍콩의 분류법

강한 열대성 폭우가 내린 후 지속적 또는 순간적으로 흙과 풍화암에 가파른 사면에서 산사태가 발생하고 보통 급류의 이동과 흐름같은 유체로 성격지어진다.

GEO에서 규정한 정의에 따르면 산사태는 채움사면(흙, 흙/바위, 바위), 절개사면, 유지구조물, 자연사면에서의 흙이나 암반의 붕괴를 말한다. 붕괴된 물질의 부피에 따라 산사태의 크기에 따라 small($< 50m^3$), medium($50 - 500m^3$), large($500 - 5000m^3$), very

large($> 5000m^3$)로 규정짓는다. 홍콩에서의 대부분의 산사태는 $50m^3$ 내외이다.

홍콩은 강우와 관련된 산사태를 그 과정에 기반하여 네 가지 유형으로 나누었다.

Type 1 : 언덕 길 채움 지역에서 사태 발생

Type 2 : 부식된 화산 절개지에서의 사태와 공동

Type 3 : 부식된 화강암에서 건설물 파괴의 성격

Type 4 : 홍콩에서 주로 발생하는 유형

가) Type 1

이 파괴는 보통 경계 위가 불투수층일 때 발생한다. 강한 강우동안 물고임, 배수감소, 채움재의 침윤은 짧은 지연이 있는 급경사의 미끄러짐을 이끈다.

나) Type 2

이 파괴는 절개지의 꼭대기 밑으로 이어지는 미끄러짐의 주요한 부분을 가진 불교란 토양에서 광범위하게 발생한다. 또한 항상 강한 강우 시 발생한다.

다) Type 3

이 파괴는 절개면에서 발생하고 침투 밑부분은 포함하지 않는다. 그리고 강우 동안의 기존 절개지보다는 건조기간에 건축 중에 빈번하게 발생한다.

라) Type 4

이 파괴는 보통 강한 풍화를 받은 잔존 절리 또는 낮은 전단강도를 가지고 측면의 부분손실로 인한 불안정상태를 만드는 응회암층이 원인이다

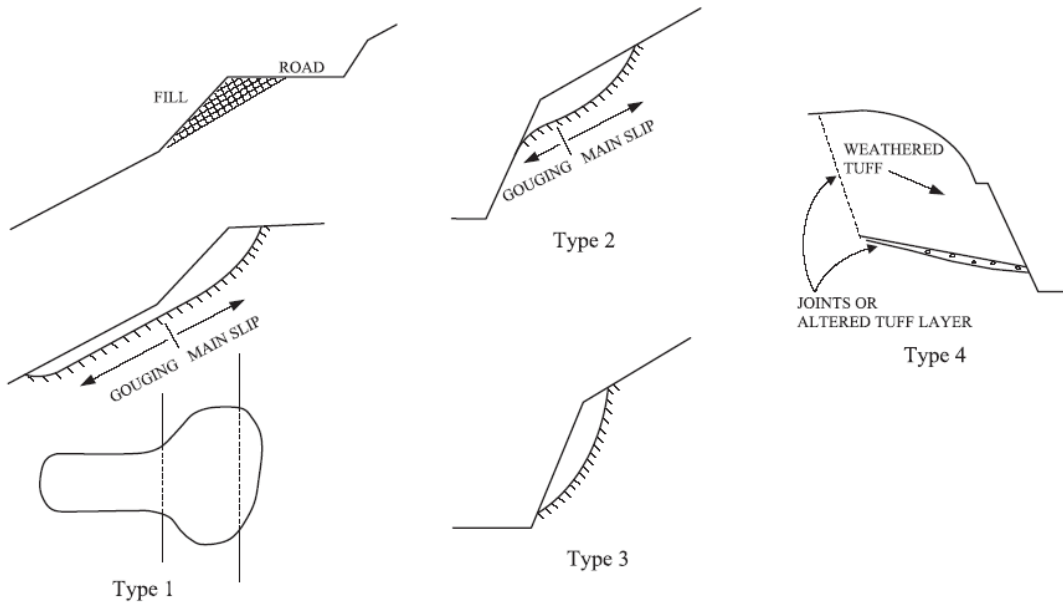


그림 3.6 강우와 관련 있는 산사태에 대한 홍콩에서의 산사태 분류(H. Chen, 2004)

4) 종합 고찰

종합적으로 살펴보면 산사태에 대한 분류에 대하여 세계 각국들은 서로 다른 기준들을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 규모를 규정하고 그 발생 원인과 형태를 나누려 하였다는 점에서 큰 차이점을 보이지 않는다.

일본과 홍콩은 빈번한 산사태의 발생으로 인하여 자국의 산사태에 대한 분석이 활발하고 오랜 연구도 이루어져 왔다. 그 결과, 자국만의 산사태 분류법을 가지고 구분하고 있다. 국내에서도 자체적으로 산사태를 분류하고 있으나 일본의 분류법과 크게 다르지 않다는 것을 알 수 있다. 또한 국내의 경우 장기간에 걸친 점진적 산사태는 거의 일어나지 않고 거의 단기 강우에 의한 급진적인 slide와 flow가 일어나는 등 다른 국가와는 다른 산사태 양상을 보인다. 일본의 경우 점진적인 대규모의 산사태 발생이 보고되고 우리나라에선 거의 찾아볼 수 없는 지진에 의한 산사태가 많이 발생하는 것으로 알려져 있다. 현재 국내 산사태 분류법은 이런 차이를 반영하지 못하고 있다.

현재 전 세계적으로 공통적으로 사용하고 있는 분류법은 Varnes가 1978년 제안한 분류법이다. 전 세계에서 일어나는 산사태를 각각에 대하여 구분하려 하였고 모든 산사태를 이 분류 안에서 설명할 수 있는 면에서 높이 평가된다. 하지만 Varnes의 분류법은

모든 산사태를 단 6개로 규정하고 있으며 각국가별 지역별 산사태 특성을 반영하지 못하고 있다. 따라서 국내에 적용 가능한 분류법을 위해서는 현재 국내에서 주로 발생하고 있는 slide와 flow의 특성을 반영한 분류법의 개발과 그에 따른 성격과 발생원인 등의 구분이 필요하다.

3. 산사태 발생원인

산사태는 지질조건이나 수리적 조건, 기후 및 지형 등의 많은 인자들에 의해 발생한다. 이런 발생 원인들은 자연적 순응에 의해 안정화 되는 과정에서 발생하는 자연적 요인과 인위적 작용에 의해 발생하는 인위적인 요인으로 분류될 수 있다.

자연적 요인은 직접요인과 간접요인으로 분류할 수 있으며 이 중 강우, 하천이나 해안의 침식, 지진 및 진동 등은 직접 요인에 속하고, 지형 및 지질조건, 식생 및 토질 등은 간접 요인에 속한다. 또한 인위적 요인에는 절토, 성토, 벌목, 채석장 개발, 댐 및 빌딩건설 등이 포함된다.

Terzaghi는 발생 요인을 내적 요인과 외적 용인으로 구분하였다. 여기서 외적 인자는 암-토층 사이의 경계면에 작용하는 전단응력의 증가를 초래하는 인자이고, 내적인 인자는 전단강도를 감소시키는 인자를 뜻한다. 이를 표로 정리하면 다음과 같다.

표 3.3 산사태 발생 요인

외적요인	내적요인
지형의 기하학적 변화 (침식, 절토) 토피 하중의 감소(침식, 절토, 벌목) 하중의 증가 충격과 진동 지하수위 변동 강우	진행성 파괴(지형, 지질, 토질, 식생) 풍화작용(산성비에 의한 풍화, 동결 융해) 물의 침투로 인한 침식 (지형, 지질, 토질, 식생)

가. 외적요인

1) 자연적 요인

가) 강우

우리나라는 연평균 강수량이 1274mm로 세계 평균인 973mm보다 1.3배 많은 다우 지역에 속한다. 기상청의 평년(1971년~2000년) 월강수량 자료에 의하면 연 평균 강수량의 64.4%가 6~9월에 집중되고 있으며 대부분의 산사태가 이 시기에 발생한다.

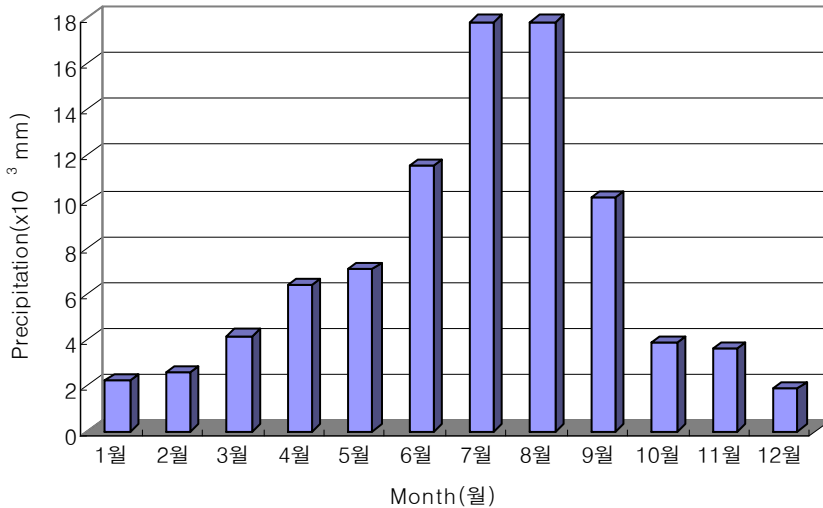


그림 3.7 평년 월평균 강수량(기상청)

사면에 비가 내리게 되면 강우 초기에는 침투가 주로 발생하고, 지속시간이 길어지고 강우강도가 증가하여 토양의 침투능을 초과하게 되면 지표저류와 지표유출이 발생하게 된다. 강우에 의해 자연 사면에 침투가 발생하게 되면 토층 내 습윤전선(wetting front)이 생성되고 강우가 지속됨에 따라 습윤 전선은 하부로 이동하게 된다. 습윤 전선이 진행함에 따라 습윤대(wetting band)의 두께가 두꺼워져 토층의 하중이 증가하여 전단응력을 증가시키며, 불포화토 사면을 유지하는 모관흡수력을 저하시켜 전단강도의 감소를 초래한다(그림 3.8, 3.9).

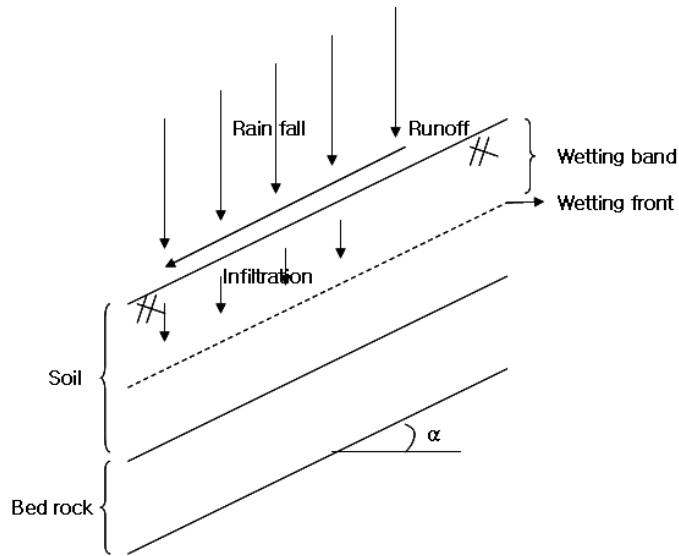


그림 3.8 강우에 의한 사면의 수문·수리 특성

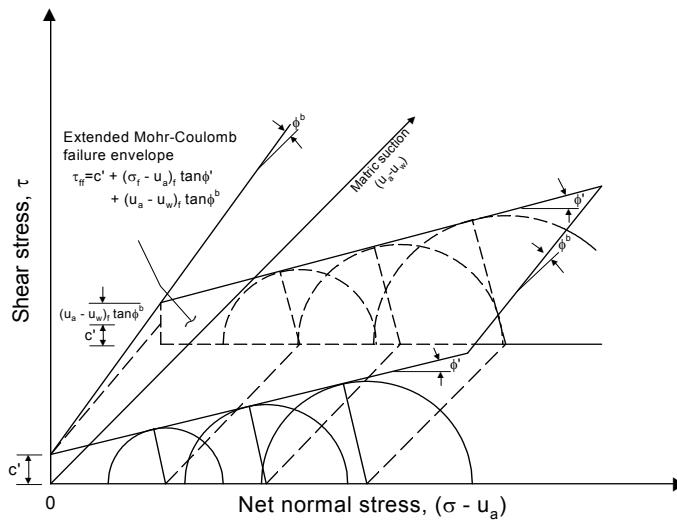


그림 3.9 Mohr-Coulomb의 파괴가설을 불포화토까지 확장한 파괴규준
(Fredlund and Rahardjo, 1993)

또한 투수성이 다른 다수 층으로 구성된 사면의 경우 국부적으로 주수지하수면(perched water table)을 형성하기도 하며, 토층 하부 압반에서의 지하수위 상승을 초

래하여 토층 내 공극수압을 증가시켜 유효응력과 전단강도의 감소를 초래하게 된다. 즉, 강우에 의해 사면은 전단강도의 감소와 전단응력의 증가를 동시에 겪게 된다. 따라서 강우는 산사태를 유발하는 인자 중 특히 중요하다.

산림청은 연속강우량, 시강우량, 일강우량과 산사태의 발생 빈도를 분석하여 산사태 주의보 및 경보를 규정하고 있다.

표 3.4 강우량에 따른 예보의 종류(산림청)

구분	산사태 주의보	산사태 경보	비고
연속강우량(mm)	100~200 미만	200 이상	발령권자 : 시장, 군수
시강우량(mm)	20~30 미만	30 이상	
일강우량(mm)	80~150 미만	150 이상	

김영목 등(2000)은 1987년부터 1996년까지 대전-충남지역에서 발생한 산사태기록을 바탕으로 강우와 산사태와의 상관성을 분석하였다. 표 1.3과 같이 최대 시간 강우량이 40~80mm사이에서 322개소가 발생하여 전체의 57%가 집중적으로 나타났으며 60mm 이하인 경우 대략 0.5ha의 적은 규모로 발생한 반면 60mm 이상에서는 1ha이상의 대규모 산사태가 발생되었다. 즉 산사태 발생빈도와 발생 규모는 강우와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

표 3.5 대전-충남지역의 최대시간 강우량 변화에 따른 산사태 발생 현황(김영목 등)

구분 \ 최대 시간 강우량	계	20mm 이하	21~40	41~60	61~80	81~100	101~120	120mm 이상
산사태 발생(개소)	568	73	79	165	157	46	46	2
발생규모(ha)	434.40	37.20	42.44	25.17	208.39	116.79	4.37	0.004
개소당 평균면적(ha)	0.76	0.5	0.54	0.15	1.32	2.53	0.09	0.02

나) 지진

지형, 지질 등 내재적으로 취약한 사면이 지진과에 의해 충격을 받으면 산사태가 발생될 수 있다. 지진에 의해 발생하는 산사태는 직·간접으로 피해를 발생시키며 그 비

율은 전체 피해의 상당 부분을 차지한다. Youd (1978)는 1964년 Alaska에서 발생한 지진을 조사한 결과 전체 피해액 중 지진에 의해 발생한 산사태의 피해액이 56%를 차지하고 있음을 밝혔으며, Kobayashi(1981)는 1964년부터 1980년까지 일본에 발생한 강도 6.9이상의 지진에 대해 분석한 결과 전체 사망자 중 절반이상이 지진에 의해 발생한 산사태에 의한 것임을 밝혔다.

다) 산불

산불이 직접적으로 산사태를 유발하지는 않지만 사면의 식생의 변화를 초래하므로 간접적인 영향력을 가진다. 산불발생으로 인하여 피해를 받은 산림지역에서는 지표보호물인 낙엽, 초본, 관목, 임목의 수관 등이 완전 소실됨에 따라 태양의 직사광선과 바람의 영향을 직접 받기 때문에 표층 토양이 건조해 단단해지고, 강수의 영향으로 지표 토양의 물리적 구조에 교란이 발생한다. 또한 산불 피해를 받은 산림 지역에서는 지표보호물이 없으므로 강우시에는 빗방울의 침식을 직접 받게 되고, 바람에 의한 침식에도 노출되므로 지표 토양의 구조가 파괴되어 무리성이 악화됨에 따라 집중 호우시 토사유출이 우려된다.

산불 이후 첫해에는 토사유출 및 침투유량이 35배 이상 증가한다는 보고가 있으며, 연구에 의하면(Debano, 1995)다수의 토질은 불에 타고나면, 물을 흡수하지 않는 속성(water repellent)을 나타내어 산불발생 직후의 토질표면은 비록 단단하고 치밀하게 보이며 물을 머금지만, 지하로 몇 mm만 들어가도 물을 머금을 수 없는 소수층(hydrophobic)이 형성된다. 이 불투수층이 형성되는 이유는 유기물이 타면서 생긴 왁스 분자들이 토양 알갱이를 감싸기 때문에 발생하는데 토양의 이런 성질은 200℃에서 생성되기 시작하여 370℃에서 최대가 되며(Debano 등, 1967), 그 이상의 온도에서는 파괴가 되기 때문에 이 불투수층의 두께는 산불의 강도와 지속시간에 따라 다르게 된다. 투수능력이 감소하면 두 가지 상반된 효과가 나타나게 된다. 첫 번째로 수분감소로 일시적으로 산사태가 감소할 수도 있으며, (지하 나무뿌리 등이 썩는 2~3년 후에는 다시 증가), 두 번째, 산불 후에는 초목이 토양을 품을 수 없는 상황으로 인하여 표토층이 강우로 포화될 경우, 깊이가 얇은 산사태가 발생하며, 특히 건조 산사태(dry ravel)가 발생할 경우, 산사태 자체의 피해뿐만 아니라 같이 쓸려온 나무등치, 바위 등이 소하천과 같은 물길을 막아 호우시 소규모 댐 붕괴와 같은 효과를 내므로 2차 피해가 더욱 심각한 문제로 대두된다.

2) 인위적 요인

철도, 도로의 건설에 따라 사면을 절성토 하는 경우에는 사면 내의 응력을 변화시켜 산사태가 발생할 수 있다. 즉, 절토에 따른 전단저항의 저하 또는 성토하중의 증가에 따른 활동력의 증대 등에 의하여 산사태가 발생하게 된다. 그 외에도 터널, 댐 등의 구조물 축조에 의하여 영향을 받을 수 있는데 산사태 위험지구에서 터널을 굴착하면 산사태가 유발될 수 있으며 댐건설에 따른 담수로 인한 지하수위의 변화나 인위적인 지형 변화에 의해서도 지하수위가 변할 경우에도 산사태 발생 가능성이 있다 (홍원표, 1990).

최근 경제 발전에 따른 국민 여가 수요증대 등으로 산지개발 요구가 급증하고 있으며, 산지 개발에 따른 임도 및 골프장, 도로 건설 등에 의한 인공사면에서의 산사태가 급증하고 있다.

나. 내적요인

1) 지형

자연 사면의 형태는 지형에 의해서 결정되므로 지형은 사면파괴 분석 요소 중 가장 중요한 사면의 기하학적 형태를 결정해 줄뿐만 아니라 지표수 및 지하수의 집중, 분산, 이동에 크게 영향을 미치며 산사태 자체가 지형발달의 한 과정이므로 산사태 발생과 밀접히 연관되어 있다 (Keller, 1979; Johness, 1983; Griffiths et al, 1990).

기하학적 형태를 결정하는 지형인자로는 사면경사, 사면길이, 곡률, 향 등이 있으며, 이 중 경사도는 사면안정성 해석에 있어서 가장 중요한 요소이다. 사면 안정 해석에 있어 경사도는 파괴를 유발하는 활동력과 관계되며 즉, 경사도가 커질수록 토체 자중에 의해 발생하는 전단 응력이 증가하게 된다.

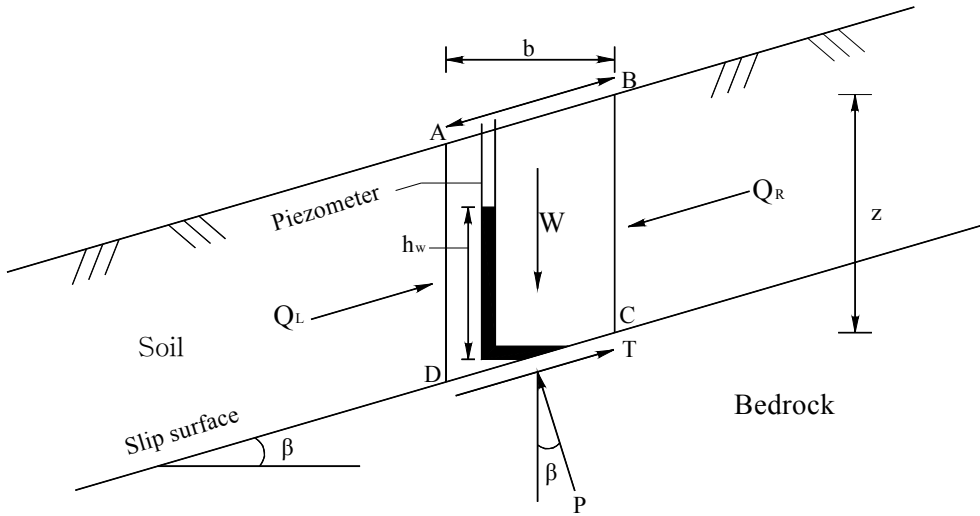


그림 3.10 무한 사면의 한 요소에 작용하는 힘

그림 3.10에서 무한 사면에 파괴를 유발하는 활동력은 Q_R 이며 그 크기는 $Q_R = W \sin \beta$ 이다. 따라서 경사도가 커짐에 따라 산사태의 위험도가 증가함을 알 수 있다. 하지만 산사태는 경사도뿐만 아니라 지질, 토심, 강우 조건 등 많은 요인들에 의해 발생하는 것이므로 경사도와 산사태 위험도는 정비례하지는 않는다.

실제 자연사면에서 사면형태에 따라 산사태의 발생현황을 살펴보기 위하여 한국자원연구소(2000)에서 2188개소에 달하는 산사태를 조사하였다.

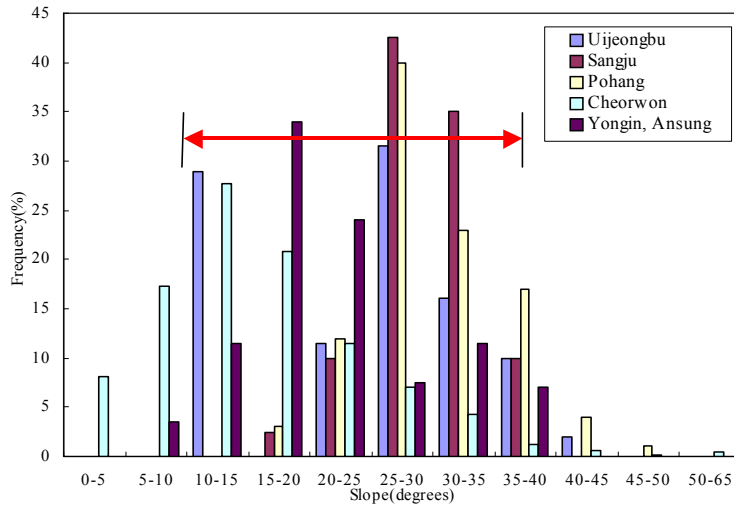


그림 3.11 사면경사도에 따른 산사태 발생 빈도(한국자원연구소)

5대 국립공원에서 발생한 산사태의 경사도는 모두 40°이하에서 발생하였으며, 31°~40°에서 56%의 발생률을 보였다. 경기북부 지역(철원)에서는 10°~20°에서 50%가 발생하였고, 20~30°에서 30%, 그리고 40°이상에서는 1%만 발생하였다. 경북 상주에서는 21~30°에서 52%, 31~40°에서 45%가 발생하였다. 경북 포항에서는 26°~35° 구간에서 64%의 산사태가 발생하였다. 경기 의정부시에서는 30°이하에서 71%가 발생하고, 40°이상에서는 1%(2개)만 발생하였다. 전체적으로 10°~40°에서 70%가 발생하는 것으로 나타났다.

표 3.6에 산사태의 발생빈도와 사면의 곡률과의 상관성을 나타내었다. 그 결과 평평한 사면뿐 아니라, -1이하의 오목사면에서 12.7% 및 1이상의 볼록사면에서 22.7%로 상당한 수의 산사태가 평형사면 이외에서 발생하는 것으로 나타났다.

표 3.6 곡률에 따른 산사태 발생빈도(Kinam, 2000)

Curvature value	Landslide frequency	Percentage of landslide frequency	Area(km ²)	Percentage of area	Landslide frequency per unit area
-99 ~ -4	2	0.1	0.99	0.08	2.02
-4 ~ -1	277	12.7	51.63	4.19	5.37
-1 ~ -0.5	291	13.3	83.28	6.76	3.49
-0.5 ~ -0.4	105	4.8	28.37	2.30	3.70
-0.4 ~ -0.3	116	5.3	34.90	2.83	3.32
-0.3 ~ -0.2	132	6.0	42.78	3.47	3.09
-0.2 ~ -0.1	136	6.2	54.06	4.39	2.52
-0.1 ~ -0.001	131	6.0	82.24	6.68	1.59
-0.001 ~ 0.001	34	1.6	520.51	42.25	0.07
0.001 ~ 0.1	104	4.8	74.71	6.06	1.39
0.1 ~ 0.2	96	4.4	45.84	3.72	2.09
0.2 ~ 0.3	105	4.8	34.59	2.81	3.04
0.3 ~ 0.5	91	4.2	27.47	2.23	3.31
0.5 ~ 1	72	3.3	22.35	1.81	3.22
1 ~ 4	260	11.9	68.46	5.56	3.8
4 ~ 15	234	10.7	58.63	4.76	3.99
15 ~ 50	2	0.1	1.22	0.1	1.64
Total	2188	100	1232.03	100	47.65

경사도는 강우 시 사면의 침투거동에도 영향을 미친다. 이선주(2001)는 모형 실험을 통하여 강우 시 사면의 간극수압비를 산정한 결과, 경사도가 증가할수록 계속 증가하다가 1:1.5 이상의 경사에서는 감소함을 보였다(그림 3.12).

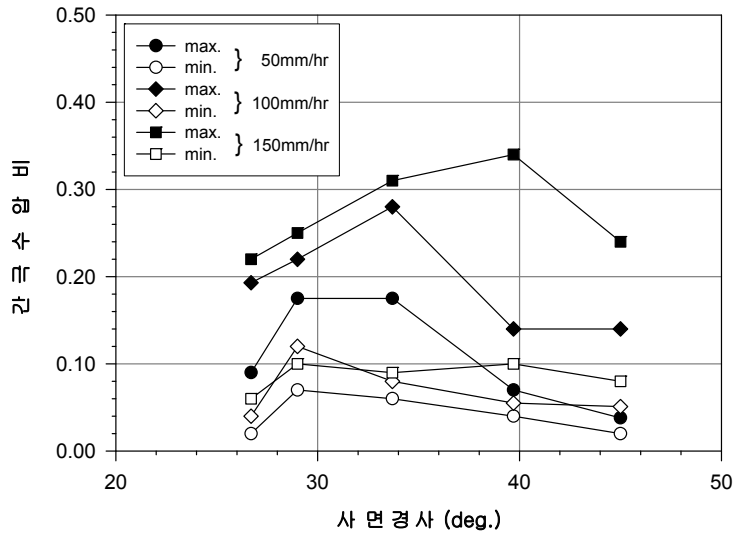


그림 3.12 강우강도에 따른 최대 최소 간극수압비의 변화 (이선주, 2001)

2) 지질 및 토질

산사태는 지질구조와도 깊은 관련을 가지고 있으며, 특히 파쇄대, 단층, 습곡, 단사구조 및 암맥의 관입 등은 산사태에 큰 영향을 준다. 구체적인 지질 및 토질조건으로는 기반암의 종류와 상태로서 절리와 불연속면의 밀도, 크기, 뒷채움재, 주향과 경사각의 사면경사와 이루는 각, 그리고 인장균열, 풍화도 등이 기반암에 대한 검토사항이 되고, 표토층에 대해서는 토층의 깊이, 입도, 전단강도, 소성지수, 액성한계, 활성도, 투수성, 건조균열, 이질지층, 기반암과의 접착상태, 지중 배수통로 등이 고려대상이다. 기반암의 종류에 따른 산사태 발생빈도가 높은 순서는 화강편마암, 점판암 및 사질암, 천매암, 석회암의 순서로 산사태 위험도 판정에 이용되고 있다(박용원 등, 1991).

일반적으로 산사태가 일어나기 쉬운 지질로는 제 3기층, 파쇄대, 화산온천지 등을 들 수 있는데 제 3기층은 고결도가 불충분하고 함수율도 매우 크기(15~20%) 때문에 상당 깊이까지 풍화가 진행되어 풍화생성물이 점토화되는 성질이 있다. 한편, 파쇄대에서는 지질구조선 혹은 단층선에 따라 암석이 파괴되는 지대로서 이 파쇄대에 산사태가 발생하기 쉽다. 온천지에 발생하는 산사태는 화산암류의 풍화에 의한 점토화가 그 원인이 되고 있다. 일본이나 대만과 같은 환태평양 구조선상에 위치한 나라에서는 제 3기층이 거의 없어 산사태는 특수한 단층, 파쇄대에 의한 것이 대부분이다(홍원표, 1990).

한국지질자원연구원(2003)은 지질특성을 고려한 산사태예측모델을 개발하기 위해 우리나라를 편마암으로 대변되는 변성암, 화강암, 그리고 한반도의 동남부에 분포하는 퇴적암 및 화강암 지역으로 분류하여 지질별 토질과 지형특성 등 산사태 유발인자와 산사태의 상관성을 분석하였으며 지질별 토질 특성을 산사태의 발생 유무에 따라 요약하면 다음과 같다.

가) 변성암 및 화강암 지역

건조밀도의 경우 산사태 발생지에 비해 미발생지에서 높은 값을 나타내었으며 투수계수 또한 같은 양상을 나타내었다. 자연사면의 경우 불포화 지반으로서 투수계수는 함수비에 따라 변하게 되며 일반적으로 투수계수가 높을수록 사면 불안정을 유발하는 공극수압의 발생정도가 낮아 사면 안정률이 증가하게 된다. 김영원 등(1999)은 투수계수와 산사태의 발생빈도를 통계적으로 분석하여 투수계수가 높을수록 산사태 발생 확률이 감소함을 보였다.

아터버그 한계의 경우 산사태 발생지와 미발생지에서 큰 차이를 보이지 않았으며, 통일분류법에 의해 분류한 결과 SW-SC로 분류된 곳이 SW나 SC로 분류된 곳에 비해 산사태 위험률이 높은 것으로 나타났다.

나) 퇴적암과 화산암 분포지역

퇴적암과 화산암 지역의 경우 변성암과 화강암 지역과 마찬가지로 건조밀도의 경우 산사태 발생지에 비해 미발생지에서 높은 값을 보였다. 마찰각은 흙의 전단강도를 구성하는 인자이므로 산사태 발생지에서보다 미발생지에서 높은 값을 나타내었다.

아터버그 한계의 경우 퇴적암과 화산암지역이 변성암과 화강암지역에 비해 소성이 높은 것으로 나타났으나 산사태와의 상관성은 미비한 것으로 나타났으며, 통일분류법에 따른 분류에서도 흙의 종류별 산사태와의 상관성은 적은 것으로 나타났다.

이수곤 등(2003)에 의하면 산사태가 일어난 사면의 경사는 화강암 지역의 경우 평균 경사가 42°~50°, 변성암 지역의 경우는 34°~50°, 퇴적암 지역은 33.5°로 나타났으며 산사태가 발생한 후 경사는 변성암 지역은 산사태가 발생한 후 경사가 증가하였고, 화성암 지역은 원사면과 비슷한 경사를 유지, 퇴적암의 경우 낮아지는 것으로 나타났다. 또한 봉곡규모면에서도 변성암 지역이 화성암 지역이나 퇴적암 지역보다 월등히 큰 것으로 나타났는데, 이것은 변성암 지역이 화성암 지역보다는 풍화토층이 깊기 때문이다.

3) 식생

식생은 산사태를 억제하는 효과와 촉진하는 효과를 동시에 가지고 있다. 억제효과로서는 나뭇잎의 차양막 효과, 뿌리의 보강토 효과, 뿌리의 수분흡수에 의한 지반 함수비 감소 효과, 뿌리에 의한 조립입자 탈락방지 효과 등이 있다. 한편, 산사태 촉진 효과로서는 태풍 시 토양의 수분흡수력을 감소시키고 지하수위를 상승시킴, 암사면에서의 뿌리의 썩기작용, 강풍 등으로 인한 지반 교란으로 침투로를 형성하고 전단강도를 저하시키는 현상이 있다. 또한, 나무 무게에 의한 상재압의 증가는 활동력 증가효과와 저항력 증가효과를 함께 가지고 있으나 강풍이 불어 큰 수평하중이 발생하면 주로 활동력을 증가시켜서 산사태 촉진효과로 작용하게 된다. 식생이 산사태 억제기능을 충분히 하려면 뿌리가 산사태 활동면 깊이보다 충분히 깊고 튼튼히 박혀서 보강 역할을 할 수 있어야 한다(박용원 등, 1993).

이인모 등(1991)은 뿌리강도가 자연사면 안정에 미치는 영향에 관한 실험연구를 통하여 뿌리에 의해 사면의 전단강도가 증가함을 보였으며, 뿌리 보강효과로 인한 사면에서의 안전율 증가는 사면파괴의 규모가 대체로 작은 얇은 파괴가 예상되는 지역에 유리하다고 하였다.

최경 등(1993)은 1991년 경기도 용인, 안성, 화성군 일대의 산사태 발생지에서 임상 및 수종별 산사태 발생 빈도를 분석하여 산사태 예방용 적정 수종에 대해 연구하였다. 연구 결과 수종별 산사태 발생 면적률은 소나무 0.88%, 활엽수 1.87%, 리기다소나무 1.88%, 잣나무 2.91%, 활엽수 3.01%로 소나무, 리기다소나무림과 활엽수림에서 가장 낮았으며 1,000ha당 산사태발생 개소수는 소나무는 88개소, 활엽수 193개소, 낙엽송 228개소, 리기다소나무 254개소, 잣나무 284개소로 소나무림과 활엽수림에서 가장 적었다. 수관밀도는 41~70%에서 임분경급에서는 중경목 이상 임분(흉고직경 18cm 이상)에서 산사태발생률이 낮았고, 수종별 최소 붕괴깊이는 활엽수림이 50cm, 리기다소나무 40cm, 소나무 30cm, 무림목지가 10cm로 나타났다. 뿌리의 최대깊이, 뿌리의 분포상태 및 근계의 지지력으로 볼 때 타 수종에 비하여 떡갈나무, 졸참나무, 상수리나무, 굴참나무 등 참나무류가 산사태 방지에 효과적인 수종으로 조사되었으며 따라서 산사태발생 위험지역 내 토심이 깊은 지역에서는 참나무류림을 조성하며, 토심이 얇은 지역에서는 소나무와 리기다소나무림이 효과적인 것으로 조사되었다.

이인모 등(1991)은 뿌리강도가 자연 사면 안정에 미치는 영향을 분석하기 위해 실험을 통하여 뿌리에 의한 사면 흠층에서의 전단 강도 증가를 조사하였으며, 사면안정해석을 수행한 결과 뿌리의 보강 효과는 얇은 사면 파괴에 효과가 있음을 보였다. 표 3.7에

식생이 사면안정에 미치는 영향에 관하여 정리하였다.

표 3.7 식생과 사면안정과의 관계

요 인		요인의 영향
침투에 의한 soil suction의 감소와 지하수위의 상승		H, A
나뭇잎의 강우차단 효과와 수분 지, 증발에 의한 유효강우의 감소		H, B
뿌리의 보강재 효과에 의한 토층의 전단강도 증가		M, B
뿌리의 수분흡수, 증산에 의한 토층의 수분감소		M, B
나무하중 부가에 의한 전단력과 활동력 증가		M, A/B
암사면중 뿌리의 썩기작용과 나무 쓰러짐에 의한 강우의 침투용이		M, A
지질의 증가, 역질의 탈락방지, 토층내의 앵커 및 지주(支柱)의 역할		M, B
A, 사면안정에 역효과	B, 사면안정에 효과	
H, 수문학적 요인	M, 역학적 요인	

다. 국내의 산사태 원인 특성

일반적으로 산사태의 직접적인 요인은 강우이며 지질, 지형, 토양, 식생의 간접적인 요인에 의해 산사태가 발생한다. 하지만 최근에는 산업의 발달에 따라 도로, 택지개발, 골프장·스키장의 절토/성토사면, 묘지조성, 채석장의 개발, 진지구축, 기도원 건설 등의 인위적인 요인이 많은 위험을 초래하고 보다 대형화되어가고 있는 추세이다.

현재 국내에서 발생하는 산사태의 유형은 대부분이 이동속도가 매우 빠른 쇄설형 유동형이 대부분으로 많은 인명피해를 유발시킨다. 이런 산사태들의 대부분은 95%이상이 7~8월에 집중하여 발생하였고, 이 기간 중의 강우량이 년 강우량의 55%이상을 차지하여 사면 붕괴의 주원인이라는 연구가 발표되었다. 표 3.8는 1980~1983년까지 국내에서 발생한 산사태의 지표면 및 토양단면상의 불연속에 의한 산사태의 발생빈도를 나타낸다.

표 3.8 지표면 및 토양단면상의 불연속에 의한 산사태 발생빈도

발생원인	조사개소수	발생빈도 (%)
지표면의 불연속	51	16
· 경사도가 급변하는 지역	19	6
· 도로와의 접경지	16	5
· 산림지와 암석지와의 경계부	13	4
· 식생(임상)이 급변하는 지역	3	1
토양단면상의 불연속	256	81
· 토양단면이 급변하는 지역	41	13
예) 토양층내에 자갈층이 있는 지역		
토양층내에 점토층이 있는 지역		
· 표토층 밑에 바로 암반층이 있는 지역	38	12
· 토양층 밑에 미풍화 모재층(불투수층)이 있는 지역	117	37
· 토양층 밑에 점토화가 용이한 모암(이암, 점판암 등)층이 있는 지역	60	19
계류의 중형침식	10	3

이 경우에 의한 사면파괴의 영향은 선행강우량과 최대 시우량으로 구분하여 해석한다. 일반적으로 일본에서는 사태가 있기 전의 선행강우량을 홍콩에서는 최대 시우량을 사면붕괴의 강우조건으로 간주하고 있다. 일본의 경우 사면이 세립토로 이루어져 완만한 붕괴속도를 갖는 지각형태의 사면붕괴가 많다. 이러한 사면붕괴의 경우 선행강우량이 중요한 요소이다. 반면 홍콩의 경우 사면의 재료가 화강암 및 화산암을 모암으로 하는 잔류토 및 붕적토가 주류를 이루고 있으며 사면내의 토굴과 잔류절리가 발달함으로써 비교적 투수성이 높은 지질구조로 이루어져 빠른 속도의 사면붕괴가 많다. 이러한 지각차이로 인하여 강우를 해석하는 방법이 차이가 난다.

국내의 경우를 살펴보면 표 3.9를 살펴보면 최대 시우량 발생 ±1시간에 산사태가 발생하였음을 알 수 있다. 이것은 사면붕괴와 최대 시우량과 관련이 있다는 것을 보여준다.

표 3.9 최대 시우량과 사면붕괴 발생의 시간차

지역	시간												시우량 (mm)	최대 시우량 (mm)	일우량 (mm)	전일 우량 (mm)	발생 연도
	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8						
서울 시흥				○									30.1	60.2	253.4	81.6	87
경기 김포			○										43.0	41.0	211.0	39.0	87
거창 신원		○											32.1	34.5	215.2	15.8	87
전북 익산										○			62.0	70.0	212.2	0	87
산청 금서				○									49.5	49.5	238.3	-	87
포천 군내				○									70.0	77.0	541.9	35.2	87
충남 부여						○							72.0	77.0	541.9	35.2	87
부산 사하			○										56.0	560.0	264.0	144.0	89
전남 장성			○										68.0	68.0	429.5	-	89
경북 영풍											○		31.5	66.0	46.0	154	90
경기 수원								○					33.9	54.1	141.1	276.3	90
경기 용인				○									80.0	80.0	218.0	30.0	91
경북 영주				○									32.0	40.0	227.0	5.0	90
충북 충주					○								44.4	44.4	263.0	40.0	94
충남 보령			○										69.5	69.5	361.5	75.0	95
강원 철원			○										60.0	60.0	268.0	242.0	96

제 3 절 산사태 현황 연구

1. 국내 산사태 발생 현황

가. 문헌조사

국내에서는 오래전부터 많은 산사태가 발생되었다. 그 이유는 앞에서 언급 했듯이 여름에 장마와 태풍으로 인한 집중호우로 사면 붕괴가 이어졌다. 표 3.10은 1976년~2000년까지 25년간의 산사태에 대하여 정리하였다.

이 표에서 산사태 발생 면적측면을 보면 25년 동안의 평균 산사태 발생 면적은 286ha이며 1991년부터 2000년 까지 10년간은 350ha, 1996년부터 2000년까지 5년간은 434ha로 점차 산사태 발생면적이 증가하고 있음을 알 수 있다. 산사태 면적이 점차 증가되고 있는 이유는 첫째 산지개발에 따른 산림 훼손지의 증가와 불합리한 산지 이용과 두 번째 부단히 노력해온 복구사방사업과 치산녹화 사업의 성과로 모든 산이 푸르게 녹화되어 토양이 안정되고 토심이 깊게 형성되었으나 이에 따르는 예방사방(산사태 방지공사, 사방댐 등)공사와 숲 가꾸기 사업의 미비로 산사태 발생이 증가되고 있기 때문이다.

이와는 달리 인면피해 상황을 보면 26년간 년 평균 인면피해는 43명에서 최근 10년간에는 22명, 최근 5년간에는 26명으로 대체적으로 감소 추세를 보인다. 인명피해가 줄어들고 있는 것은 일기예보 및 재해대책본부의 활동과 산림청이 산사태 방재대책 활동에 기인한 당연한 현상이다.

산사태 피해복구비는 과거 25년간 년 평균 77억 3천8백만원, 최근10년간 156억 2천9백 만원, 최근5년간 246억 2천8백만원으로 피해복구비가 점차 늘어가고 있는 것을 알 수 있다. 이 증가는 피해발생 면적의 증가로 인한 증가로 볼 수 있다. 또한 물가의 상승으로 인하여 복구비의 객관적인 수치가 높아졌으며 복구 공작물의 질과 양이 과거에 비해 점차 향상, 증가되었기 때문이라 생각된다.

표 3.10 년차별 산사태 피해 현황

연도별	피해구분			복구비 (백만원)	강수량(mm)		태풍명
	산사태(ha)	야계(km)	인명피해 (사망)		연속강수량	최대시우량	
전체합계	7,318	192	1,062	193,465			
전체연평균	(286)	(8)	(43)	(7,738)			
76	230	-	56	476	225(부여)	67(대전)	-
77	425	-	222	2,039	474(안양)	96(안양)	앤디
78	66	-	18	149	444(남해)	86(영주)	어마어빙
79	434	-	167	2,756	474(진해)	100(진해)	쥬디
80	451	-	58	1,980	395(보은)	90(보은)	어키드
81	236	11	25	1,365	672(보성)	72(광양)	애그니스
82	91	12	9	759	277(충무)	82(완도)	엘리스
83	-	-	-	-	-	-	-
84	100	3	18	1,073	666(속초)	76(속초)	홀리
85	30	-	50	1,396	315(제주)	36(대관령)	리키드
86	12	-	-	84	271(강화)	42(강화)	베라
87	1,002	34	156	15,525	673(서천)	122(서천)	셀마,다이아
88	113	6	15	1,592	353(포천)	60(포천)	-
89	273	14	34	4,203	497(승주)	90(광주)	쥬디
90	178	6	16	3,777	530(이천)	47(영풍)	-
(91~00평균)	(350)	(11)	(22)	(15,629)			
91	727	21	48	13,331	484(부산)	86(오산)	글래디스
92	-	-	-	-	-	-	-
93	109	11	9	3,525	356(울진)	116(삼천포)	로빈
94	66	4	-	2,203	402(송탄)	100(송탄)	브렌던,더그
95	423	13	31	14,094	987(보령)	70(보령)	페이,제니스
(96~00평균)	(434)	(11)	(26)	(24,628)			
96	257	4	2	9,699	687(연천)	67(철원)	-
97	33	-	6	2,114	488(강화)	89(강화)	-
98	1,281	34	92	71,537	1,202(서울)	145(순천)	예니
99	419	11	23	28,736	975(거제)	91(파주)	올가,바트
00	182	8	7	11,052	645(군산)	93(용인)	프리피클 사오마이

1) 유형별 발생 현황

우리나라에서는 대체로 쇄설성유동(debris flow), 암석낙하(rock fall), 암석과 토양 슬라이드(planar slide), 암반포행(rock creep) 및 회전형 슬라이드(rotation slide) 5가지 형태의 산사태가 많이 발생한다. 그 중 산사면 계곡부를 따라 발생하는 쇄설성유동 형태의 산사태가 가장 많다. 쇄설성 유동은 산사면 상부의 잔류토양과 붕적토에서 발생하는 전이형슬라이드(translational slide) 물질이 계곡부로 유동하여 발생한다. 그러므로 전이형슬라이드를 수반하지 않는 쇄설성 유동은 규모가 크지 않은 것이 특징이다(김원영 외, 1999).

2) 강우에 의한 발생현황

강우에 의해 침투가 발생되면 습윤전선(wetting front)가 생성되고 지속시간이 길어짐에 따라 습윤전선은 하부로 이동하게 된다. 습윤전선이 진행함에 따라 토피의 하중이 증가되어 전단응력이 증가되고 습윤에 의한 모관흡수력의 저하로 전단강도가 감소한다. 즉 사면은 강우에 전단응력의 증가와 전단강도의 감소를 동시에 겪게 된다. 따라서 강우는 산사태 해석에 있어 특히 중요한 인자이다. 산림청은 연속강우량, 시강우량, 일강우량과 산사태의 발생 빈도를 통계적으로 분석하여 산사태 주의보 및 경보를 규정하고 있다.

3) 인위적인 요소에 의한 발생 현황

철도, 도로의 건설에 따라 사면을 절성토 하는 경우에는 사면 내의 응력을 변화시켜 산사태가 발생할 수 있다. 즉, 절토에 따른 전단저항의 저하 또는 성토하중의 증가에 따른 활동력의 증대 등에 의하여 산사태가 발생하게 된다. 그 외에도 터널, 댐 등의 구조물 축조에 의하여 영향을 받을 수 있는데 산사태 위험지구에서 터널을 굴착하면 산사태가 유발될 수 있으며 댐건설에 따른 담수로 인한 지하수위의 변화나 인위적인 지형 변화에 의하여서도 지하수위가 변할 경우에도 산사태 발생 가능성이 있다(홍원표, 1990).

4) 지형에 의한 발생현황

기하학적 형태를 결정하는 지형인자로는 사면경사, 사면길이, 곡률, 향 등이 있다. 김원영 등(2000)은 우리나라 산사태를 조사하여 형태를 분류하고 경사도와 산사태 발생 빈도, 표면 곡률과 산사태 발생빈도를 분석하였다(그림 3.13, 3.14).

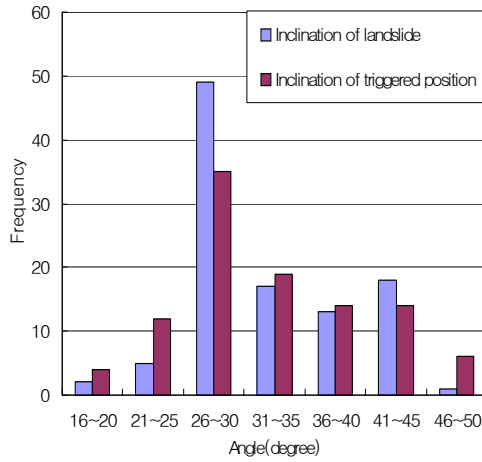


그림 3.13 경사별 산사태 발생 빈도

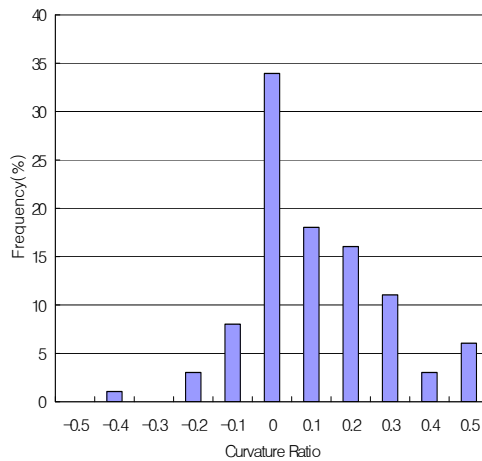


그림 3.14 곡률과 산사태 발생빈도

위 그림에 따르면 26°~30°경사도를 가지는 사면과 사면형상이 대체적으로 평탄한 지역에서 가장 많은 산사태가 일어남을 알 수 있다.

5) 지질 및 토질에 의한 발생현황

산사태는 지질구조와도 깊은 관련을 가지고 있으며, 특히 파쇄대, 단층, 습곡, 단사구조 및 암맥의 관입 등은 산사태에 큰 영향을 준다. 구체적인 지질 및 토질조건으로는

기반암의 종류와 상태로서 절리와 불연속면의 밀도, 크기, 뒷채움재, 주향과 경사각의 사면경사와 이루는 각, 그리고 인장균열, 풍화도 등이 기반암에 대한 검토사항이 되고, 표토층에 대해서는 토층의 깊이, 입도, 전단강도, 소성지수, 액성한계, 활성도, 투수성, 건조균열, 이질지층, 기반암과의 접촉상태, 지중 배수통로 등이 고려대상이다. 기반암의 종류에 따른 산사태 발생빈도가 높은 순서는 화강편마암, 점판암 및 사질암, 천매암, 석회암의 순서로 산사태 위험도 판정에 이용되고 있다(박용원 등, 1991).

이수곤 등(2003)에 의하면 산사태가 일어난 사면의 경사는 화강암 지역의 경우 평균 경사가 42°~50°, 변성암 지역의 경우는 34°~50°, 퇴적암 지역은 33.5°로 나타났으며 산사태가 발생한 후 경사는 변성암 지역은 산사태가 발생한 후 경사가 증가하였고, 화성암 지역은 원사면과 비슷한 경사를 유지, 퇴적암의 경우 낮아지는 것으로 나타났다. 또한 붕괴규모면에서도 변성암 지역이 화성암 지역이나 퇴적암 지역보다 월등히 큰 것으로 나타났는데, 이것은 변성암 지역이 화성암 지역보다는 풍화토층이 깊기 때문이다.

6) 식생에 의한 발생현황

최경 등(1993)은 1991년 경기도 용인, 안성, 화성군 일대의 산사태 발생지에서 임상 및 수종별 산사태 발생 빈도를 분석하여 산사태 예방용 적정 수종에 대해 연구하였다. 연구 결과 수종별 산사태 발생 면적률은 소나무 0.88%, 활엽수 1.87%, 리기다소나무 1.88%, 잣나무 2.91%, 활엽수 3.01%로 소나무, 리기다소나무림과 활엽수림에서 가장 낮았으며 1,000ha당 산사태발생 개소수는 소나무는 88개소, 활엽수 193개소, 낙엽송 228개소, 리기다소나무 254개소, 잣나무 284개소로 소나무림과 활엽수림에서 가장 적었다.

7) 결론

국내 산사태의 경우 대부분 집중호우가 발생하는 6~9월에 발생하며 붕괴의 형태는 사면과 평행한 얇은 파괴에 의한 쇄설성 유동(debris flow)인 것으로 조사되었다. 강우가 사태 발생의 가장 큰 요인이었지만 지역적 특색을 보이고 있었으며 지질, 토질, 식생 등 내재적으로 취약한 부분을 가지고 있는 사면이 강우에 의해 파괴가 일어남으로 조사되었다. 따라서 각 인자들의 상호관계와 역학적 거동을 규명하고 국부적인 사면 해석보다는 넓은 지역을 포괄할 수 있는 광역적인 산사태 예측기법이 필요하다.

나. 항공 및 위성영상에 의한 현황 파악

1) 목적

우리나라에서는 해마다 크고 작은 산사태가 많이 발생하고 있다. 특히 대부분의 강우가 집중되어 있는 여름철에 산사태가 집중적으로 발생하고 있으며 주거지나 인적이 드문 지역의 경우에는 산사태의 파악이 쉽지 않고 조사를 위한 접근 또한 용이하지 않다. 만약 산사태의 발생 유무와 규모를 쉽게 파악할 수 있다면 산사태의 발생 빈도와 지역 및 위치를 분석하여 산사태 발생을 예측하는데 중요한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

2) 연구 방법

가) 연구 지역

연구대상은 우리나라 전역을 기본으로 하고 있지만 그 적용성만을 검증하기 위해서 연구 과제인 "역학적 기법을 이용한 자연 사면의 재해 예측 시스템 개발"의 연구 사이트를 바탕으로 검증하였다. 연구지역은 경기도 양주시 장흥면 석현리와 일영리이며, 경도는 126°55'30" ~ 126°58'30"이고, 위도 37°43'30" ~ 37°45'00"에 해당된다.

나) 연구지역에 대한 분석 방법

연구지역인 경기도 장흥의 산사태 유무를 파악하기 위하여 해상도 30m×30m의 저해상도 영상인 Landsat7 ETM+ 영상을 이용하여 분석하였다. 위성영상은 연구지역에서 산사태가 많이 발생했던 2000년과 2001년의 영상을 사용하였다. 영상의 분류 정확도 즉, 산사태의 발생 위치의 검증을 위해서 사용된 자료는 경기도청에서 조사한 보고서를 인용하여 ArcGIS Info에서 수치지도(digital map)와 연구지역인 장흥지역의 위성 영상을 중첩(overlay)시켜서 위치를 표시하고 좌표 등의 속성(attribute)데이터를 기록하였다. 사용된 영상분석 툴(tool)로는 일반적으로 폭 넓게 쓰여지고 있는 Erdas IMAGINE 8.4를 사용하였다.

이 툴을 이용하여 기하보정(rectification), 무감독분류(unsupervised classification), 감독분류(supervised classification), 분광특성에 따른 영상강조(spectral enhancement) 등을 실행하여 영상을 분류하고 비교 분석하였다.

3) 결과 및 고찰

연구지역 및 우리나라 대부분에서 발생하는 산사태는 파괴사면의 길이가 평균 42m, 폭 13m, 파괴심도는 평균 1.1m로서 대부분의 경우 Landsat 영상의 해상도인 30m×30m

에 포함되는 것이 일반적이다. 이러한 경우 무감독분류와 지수를 이용한 영상분석에서 보듯이 산사태에 해당되는 분광특성만이 픽셀값에 반영되는 것이 아니라 식생과 산사태가 혼합된 분광특성을 보이면서 다양한 값으로 나타나고 있는데 이러한 분광특성으로는 산사태를 분류하는데 결정적인 문제점으로 나타난다. 따라서 무감독분류와 지수를 이용한 영상분석으로는 산사태의 흔적으로 파악되는 위치를 판별하는데 어려움을 보였기 때문에 감독분류법을 이용하여 산사태로 분류된 분광특성의 대표값을 가지고 동일한 분광특성을 보이는 픽셀값을 분류해 보았다. 그 결과, 경기도에서 조사한 산사태 발생현황과 비교하여 20%의 정확도를 보이는 것을 알 수 있었다.

4) 결론

위성을 이용해서 산사태를 파악하는 방법은 피복의 분류에 의하여 이루어질 수 있는데 산사태가 발생한 곳은 슬라이딩에 의해서 식생 피복이 없는 토양이 들어나기 때문에 주변부의 식생과 토지의 분광특성을 이용해서 분류하면 산사태의 발생을 감지할 수 있다는 원리를 바탕으로 행하였다. 분류방법은 무감독분류와 감독분류 그리고 분광특성에 따른 영상강조(spectral enhancement)를 이용하여 식생이 없는 토양의 분광특성을 보이는 픽셀값들을 추출하고 이전의 영상과 비교하여 최근에 발생한 것인지에 대하여 판단한 뒤 산사태의 가능성을 평가하였다. 그리고 데이터의 정확성을 검증하기 위하여 경기도에서 조사한 산사태 발생현황자료와 비교하였다. 하지만 Landsat7의 해상도가 낮아서 우리나라에서 발생하는 소규모의 산사태를 분류하기에는 어려움을 보였고 그 정확도가 20%에 그쳤다. 따라서 낮은 해상도를 가지는 영상에 의한 산사태의 현황 파악을 위해서는 추후 더 많은 연구가 필요하다.

2. 해외 산사태 발생 현황

해외에서 일어나는 산사태는 우리나라에서 일어나는 것과 많은 차이점을 보인다. 간혹 지질조건이나 강우조건이 비슷하여 유사성을 보이는 곳도 있지만 규모나 발생 조건에서 차이를 나타나게 된다. 우리나라의 산사태는 거의 강우에 의한 얇은 파괴의 유형을 보이지만 다른 나라에서는 규모가 수 평방킬로미터의 면적에 수십만 m^3 의 부피를 발생시키는 산사태도 빈번하게 발생한다. 물론 전 세계적으로 산사태는 주로 강우에 의해 발생하지만 지진대에 속해있는 지역의 경우 지진에 의해 대규모 산사태가 발생하기도 한다.

다음은 우리나라와 근접해 있는 중국, 일본, 홍콩 등 여러 국가의 산사태 경향을 알아본다.

가. 중국

중국의 경우 광대한 넓이 때문에 그 지역의 특성을 한마디로 표현 할 수 없다. 장소마다 그 특징들 때문에 산사태 발생요인과 현황도 한마디로 정리할 수 없다. 여기서는 중국 남부에서 발생한 사건과 남동쪽 국가인 티벳 등 몇 가지 사례만을 살펴본다.

1) 중국 Chongqing

Chongqing 시는 중국 남서쪽 사천성에 위치한 인구 3000만의 도시이다. 이 지역은 자연재해가 빈번하게 발생하여 방지와 예측기술의 필요성이 크다.

이 지역의 산사태 발생 요인은 사면 경사와, 강우로 인한 지하수위 상승, 인위적 영향, 지진, 홍수, 지질학적 요인 등이 있다.

가) 지형

이 지역의 경사 분포를 보면 그림 3.15와 같이 대체로 15°~50°로 완만한 경사보다는 약간 급한 경사가 많이 분포되어 있다. 산사태 발생 빈도도 그 영역에서 크다.

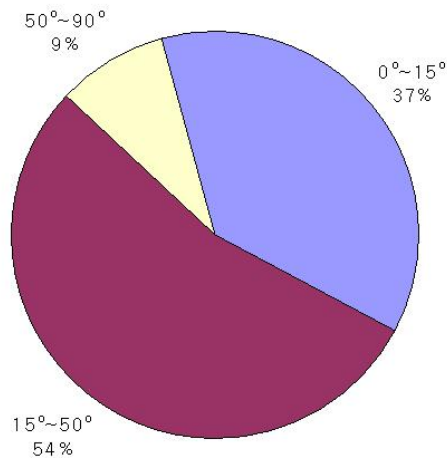


그림 3.15 Chongqing시의 사면 경사도별 분포(H. Chen, 2004)

나) 지질

Chongqing시는 쥬라기 시기의 퇴적암으로 이루어져 있으며 퇴적암은 거의 이암 또는 사암이다. 이암은 illite와 askanite가 많이 포함되어 있고 빠르게 부피변화가 일어나며 물과의 접촉에 의해 쉽게 부서진다.

다) 강우

이 지역의 강우강도는 1125mm로 많은 편은 아니지만 단기간 강렬한 폭우로 인하여 사면이 불안정한 상태에 이르게 한다. 표 3.11은 강우에 따른 이 지역 사면 상태를 나타내고 있다.

표 3.11 Chongqing시의 강우에 따른 사면 상태(Li, 1995)

강우강도(mm/hr)	사면의 외면상태
≥ 25	표면 침식 조짐
≥ 50	표면 침식 증가
≥ 100	안정성 저하, 안정한 사면 변형과 움직임
≥ 150	안정한 사면 변형과 붕괴
≥ 200	안정한 사면 변형과 붕괴 안정한 사면 불안정성 조짐
≥ 250	안정하고 식생피복이 잘 되어 있는 사면 변형 붕괴

이 지역은 산사태가 비교적 크게 발생하기 때문에 산사태의 규모를 규정하는 규정이 다른 지역에 비하여 큰 편이다 그 규정은 표 3.12에 정리하였다.

표 3.12 산사태 규모 규정

규모	산사태 부피
Small	< 10,000
Medium	10,000~100,000
Large	100,000~500,000
Very Large	> 500,000

라) 주요 산사태

Chongqing 시에서 발생한 주요 산사태를 표 3.13에 정리하였다.

표 3.13 Chongqing 시에서 발생한 주요 산사태

산사태 발생 지역	발생 위치	발생량
Zhen Jiang Si Landslide	· 자연사면 · 홍수로 지하수위상승하여 과잉간극수압 발생	부피 약 300,000m ³
Li Zi Ba Instrument and Meter Plant Landslide	· 이암, 사암 기반의 성토사면 (25m)	부피 약 500,000m ³
Li Zi Ba Primary School Landslide	· 성토사면(9m)	부피 약 120,000m ³
Wang Jia Po Landslide	· 이암, 사암 기반의 성토사면	길이 약 120m 폭 약 80m 부피 약 60,000m ³
Geo Jiao Stove Landslide	· 파쇄된 암반위의 점토층	면적 약 1,020,000m ² 부피 약 14,200,000m ³

1) 티벳 Nyainqentanglha Shan 산지 남부

티벳에서는 대규모 산사태가 주로 발생한다. 기서는 그 중 Nyainqentanglha Shan 산지 남부에서 발생한 산사태를 살펴본다.

가) 지질

지질학적 조건을 살펴보면 Gangdise 기반 근처에 위치해 있다. 이 지역의 암반은 주로 어두운 녹색 자갈 사암, 검은 자갈 점판암, 대리석을 포함한 점판암으로 이루어져 있다. 또한 암반은 층경사 구조로 되어 있으며 표면은 심하게 풍화를 받았다. 주로 화강섬록암으로 이루어진 화산암은 편마암으로 변성되었다.

나) 강우

이 지역의 연 평균 강우량은 9605mm이고 우기가 적어도 150일 이상은 된다. 강우는 5월에서 9월까지 68%가 집중되어 있으며 6월에 가장 많은 비가 내린다. 11월에서 1월까지의 건기이다. 강우의 집중으로 인하여 산사태가 빈번하게 발생하게 된다.

다) 지진

이 지역에서는 지진의 영향으로도 산사태가 발생하는데 지진은 엄청난 흔들림과 진동으로 지반파괴와 사태에 영향을 미친다. 또한 지진파와 에너지 해방은 산사태를 일으킬 수 있게 하는 암반 조직의 파괴와 약화를 야기한다.

라) 발생 현황

2000년 4월 9일 8:00(Beijing Time) Zhamu Creek에서 발생하였다. 산사태 총 발생량은 $10^8 m^3$ 이상이고 추가적으로 눈과 얼음이 $10^8 m^3$ 이 발생하였다. 발생원인은 근교에서 발생한 지진에 의한 것이었다.

추후 추가적인 산사태에서 토석류가 발생하였고 그 부피는 최종적으로 $3 \times 10^8 m^3$ 이었다. 그 면적은 $5 km^2$ 에 달했다. 이 산사태로 인하여 댐이 형성되었고 그 높이는 60~100m이었고 바닥이 길이는 2200~2500m 이었다.

나. 일본

일본은 환태평양 지진대에 속해있다. 그리고 여름에 강우가 집중되며 그 후 태풍으로 인하여 또 한 번의 강렬한 강우가 내린다. 이런 이유로 일본은 항상 산사태의 위협에 노출되어 있다. 고속도로 건설, 도시화 등 계속된 산업개발은 그 위험을 더 크게 하였다. 이렇게 발생한 산사태는 일본에 수많은 인명, 재산 피해를 주었다. 이런 상황으로 인하여 일본은 예측과 방지를 통해 그 피해를 줄이기 위한 노력이 계속되고 있다.

1) 지형

일본은 총 길이 3000km에 5개의 주요 섬으로 이루어져 있고 총 넓이는 $378,000 km^2$ 이다. 전체 면적이 75%가 산지이며 섬들은 북쪽에서부터 Kurile Arc, Northeast Honshu Arc, Izu-Mariana Arc, Southwest Honshu Arc, Ryukyu Arc이다. 이 섬들은 북아메리카 판, 태평양 판, 유라시안 판, 필리핀 해양판의 경계에 있다. 이로 인하여 지진활동이 활발하다. 특히 일본에는 77개의 활화산이 있고 이는 전 세계 활화산중 10%를 차지한다. 이로 인하여 항상 불안한 상태에 있다.

2) 지질

사면 운동 동안의 주 지질학적 분할과 지반물질의 성격에 기반하여 일본 군도는 15개의 공학적인 지질학적 분할을 한다. 이 15개의 분할은 5개의 집합으로 나뉜다. 5개의 분할은 다음과 같으며, 그림 3.16 는 일본의 지질도를 나타낸다.

I. 선 제3기 결착지대

Mesozoic & Paliozoic 퇴적암 (Division 4)

변성암 (Division 3)

초 고철질 & 고철질 관입암

백악기 해저 퇴적암 (Division 5)

말기 중생대에서 초기 마이오세까지의 Flysch type에 퇴적암 (Division 6)

II. 심성암 지대

초기 제3기의 백악기 심성암 (Division 1)

III. 제3기 침전피복지대

산사태 발생 빈도가 높음

신 제3기(약간은 고 제3기) 반압밀 쇄설성 물질 (Division 8, 10)

화산암 (Division 9)

IV. 제4기 화산지대

암재 기반과 응회암 (Division 14)

V. 제4기 지역적 화산 쇄설 지대

후기 제4기의 화산 폭발로 인한 산성인 응집되거나 응집되지 않은 쇄설지대 (Division 13)

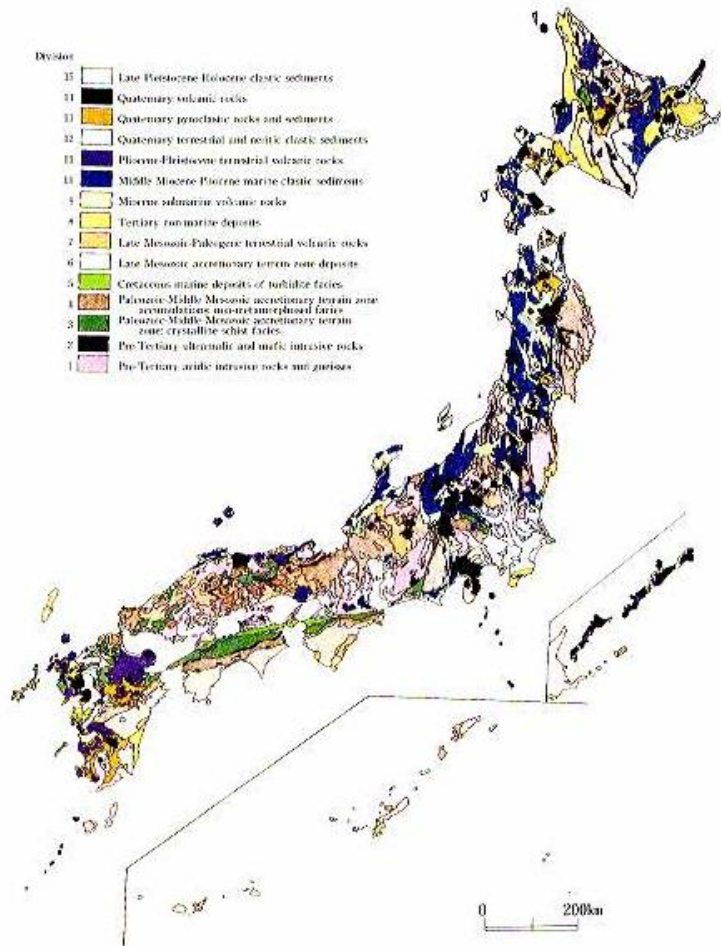


그림 3.16 일본의 지질도

3) 기후

일본은 눈이 많이 오는 나라중 하나이다. 이 눈이 봄이 되 녹게 되면 그때 산사태를 유발시킨다. 여름에는 장마의 영향으로 강우가 집중된다. 이때 토석류를 발생시키는 산사태가 많이 발생하게 된다. 가을에는 태풍의 영향을 받는다. 태풍은 강한 바람과 많은 양의 강우를 동반하기 때문에 산사태 발생을 촉진시킨다.

Tokyo(태평양 측)의 연강수량은 1405mm이고 Takada(동해 측)는 2880mm, Owase의 Kii Peninsula에서는 4002mm로 지역마다 큰 차이를 보인다.

다. 홍콩

홍콩에서의 산사태는 가파른 사면에서의 자연적 붕괴와 강한 강우로 인한 결과이다. 게다가 언덕지형의 도시개발은 산사태 발생을 증가시켰다. 대부분의 사면 파괴는 작은 규모이고 보통 표면의 물의 흐름과 얇은 침윤선으로 인한 침식 작용으로 보통 3m이하의 얇은 파괴가 일어난다.

홍콩의 주요 빌딩과 기반시설이 사면 가까이 위치해 있기 때문에 산사태 발생 시 많은 재산피해와 인명피해가 발생하였다. 이런 여러 조건들로 인하여 산사태 방지 및 예측 연구가 활발히 이루어지고 있다.

1) 홍콩의 특징

가) 지형

홍콩은 중국의 남동해안에 위치해 있다. 총 면적은 $1,075\text{km}^2$ 이고 700만명이 살고 있다. 홍콩의 경사도 분포는 주로 $15^\circ\sim 40^\circ$ 에 속해 있다(그림 3.17). 그림 3.18에서 각 경사별 산사태 빈도를 살펴보면 30° 이상에서 90%이상이 발생하는 것을 알 수 있다.

나) 지질

홍콩지역에서 중요한 암석은 Repulse Bay 화산암와 Tai Mo Shan 반상 화산암, Hong Kong 화강암, Rocky Harbour 화산암이다. 이 모든 암석은 산성 화산암이며 광물 함유율은 비슷하다. 그림 3.17는 홍콩의 지질도를 나타낸다.

다) 강우

강우측면을 보면 홍콩의 연 평균 강수량은 2225mm이다. 강우는 고르게 오는 것이 아니라 일정한 시간 집중적으로 폭우가 발생한다. 이 때 사면은 불안정 해지고 파괴가 일어난다.

라) 토질

홍콩 존재하는 토양에는 마사토(Decomposed granite), 적토(Red earth), 화산암성 풍화토(Decomposed volcanics), 해성 실트(Marine silt) 등이 있다. 각각 토양에 대한 투수성, 압축성, 점착력, 전단강도, 압밀계수 등을 표 3.11에 정리하였다.

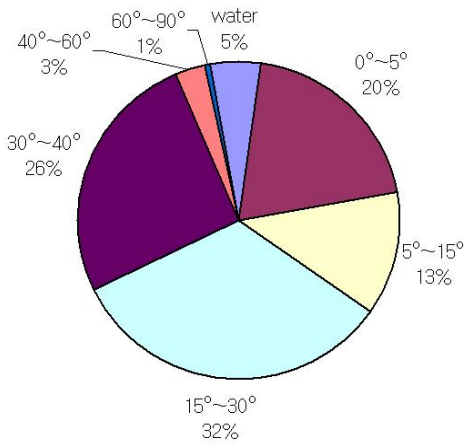


그림 3.17 홍콩의 사면 경사도별 분포

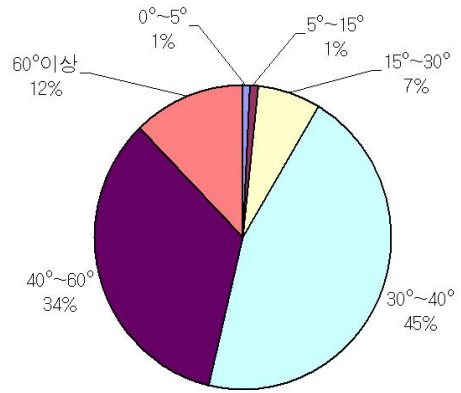


그림 3.18 홍콩의 경사도별 산사태 발생 빈도

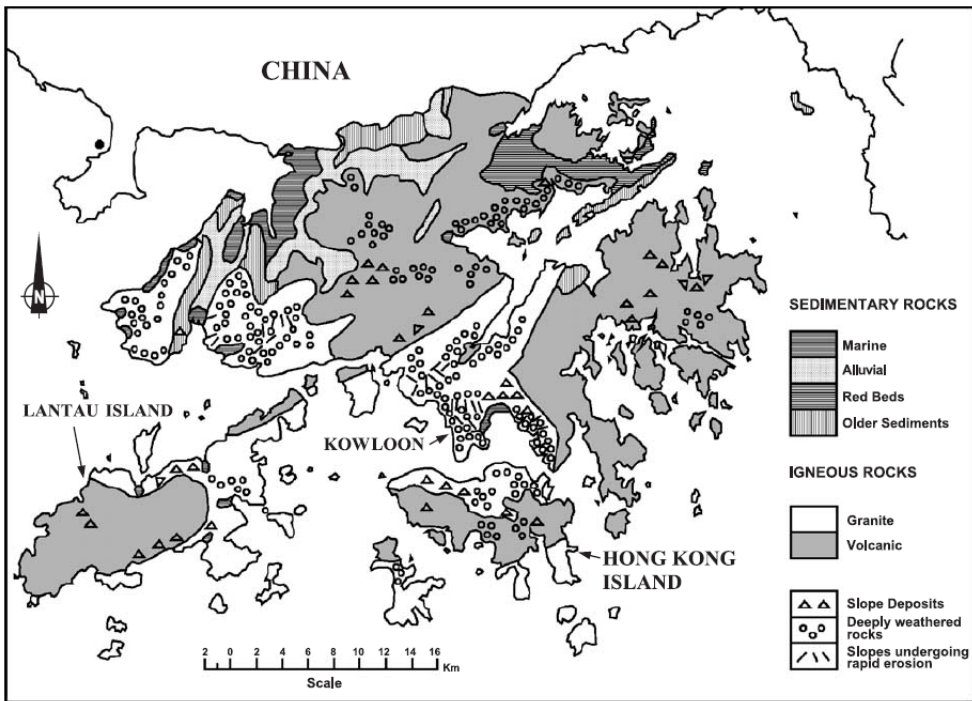


그림 3.19 홍콩의 지질도(Lumb, 1975)

표 3.14 홍콩 토양의 성질(Lumb, 1975)

토양 인자	마사토	적토	화산암성 풍화토	해성 실트
투수 계수	$4 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-9} \sim 4 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-10} \sim 2 \times 10^{-7}$
압축 계수	$3 \times 10^{-8} \sim 10^{-6}$	$7 \times 10^{-8} \sim 4 \times 10^{-7}$	$10^{-7} \sim 7 \times 10^{-7}$	$10^{-7} \sim 4 \times 10^{-6}$
압밀 계수	$3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-3}$	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	$2 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-8} \sim 2 \times 10^{-6}$
전단 강도	33~40	25~35	30~35	-
점 착 력	$0 \sim 7 \times 10^4$ <i>drained</i>	$0 \sim 2 \times 10^5$ <i>drained</i>	$0 \sim 5 \times 10^5$ <i>undrained</i>	$0 \sim 10^4$ <i>undrained</i>

2) 홍콩의 주요 산사태

홍콩에서 일어났던 산사태중 주요한 5가지를 표 3.15에 정리하였다. 그림 3.20은 각각 사건에 대한 사진이다.

표 3.15 홍콩에서 발생한 주요 산사태

산사태	발생 날짜	발생위치	원인	피해	비고
The Sau Mau Ping Landslide	1972/06/18	인공제방	강우 강도 100mm/h 총강우 300mm	71명 사망 60명 부상	
The Po Shan Road landslide	1972/06/18	자연사면	강한 단기강우로 인한 지하수위 상승	빌딩 4채 아파트 15채 67명 사망	사면 각도 36° 점토성 실트질 토양(점토 약 10%, 실트 약 30%)
The Kwun Lung Lau landslide	1994/06/23	옹벽	강한 단기강우	5명 사망 3명 부상	약 1000m ³ 의 암석 발생
The Shum Wan Road landslide	1995/08/13	피복되어있는 언덕 중턱	장기적 폭우	조선대 3곳 파괴 공장지구 파괴 1명 사망 5명 부상	20년간의 가장 큰 산사태로 기록
The Fei Tsui Road landslide	1995/08/13	절개사면	장기적 폭우	1명 사망 약간 부상	파괴 부피 14,000m ³ 최대 fast-moving cut slope failure로 기록



(a) The Sau Mau Ping landslide



(b) The Po Shan Road landslide



(c) The Kwun Lung Lau landslide



(d) The Shum Wan Road landslide



(e) The Fei Tsui Road landslide

그림 3.20 홍콩 주요 산사태

제 4 절 요약 및 결론

본 장에서는 산사태 연구수행을 위한 기본 조사로 산사태의 정의에 대하여 알아보고 국가, 연구분야 및 연구자별로 차이를 보이는 산사태 분류 방법에 대하여 조사하였다. 또한 일반적인 산사태 발생원인이 산사태에 미치는 영향을 분석하고 이로 인하여 발생한 국내의 산사태 발생 현황을 살펴보았다.

1. 산사태는 사전적으로 지진이나 큰 비 등으로, 산 중턱에 있는 암석이나 토사 따위가 갑자기 무너져 내리는 현상이라 정의할 수 있으며 연구하는 사람이나 연구 경향에 따라 약간의 차이를 보인다.

2. 산사태의 분류 연구자와 국가별로 다른 기준을 가지고 있으나 규모를 규정하려 하고 그 발생 원인과 형태를 나누려 한다는 점에서 큰 차이점을 보이지 않는다. 이 분류법들 중 지금 전 세계적으로 공통적으로 사용하고 있는 분류법은 Varnes가 1978년 제안한 분류법이다. 전 세계에서 일어나는 산사태를 각각에 대하여 구분하려 하였고 모든 산사태를 이 분류 안에서 설명할 수 있는 면에서 높이 평가된다. 하지만 각 나라마다 산사태 발생 원인에 차이가 있고 자주 발생하는 산사태 종류에 차이가 있기 때문에 자국 실정에 맞는 산사태 분류방법의 연구가 필요하다.

3. 산사태 발생원인을 내·외적인 요인과 자연적·인위적 요인으로 구분하였으며, 강우, 하천·해안의 침식 및 지진, 산불, 지질, 지형과 토질, 식생이 산사태에 미치는 영향을 분석하였다. 산사태의 주로 기후에 의하여 발생하지만 그 지역의 지형, 지질, 토질, 식생 등의 차이로 인하여 산사태 발생 규모, 형태 등이 달라지게 된다. 따라서 산사태 발생 원인을 복합적으로 분석할 필요가 있으며 그에 대한 역학적 기작의 분석이 필요하다.

4. 국내 산사태의 발생현황은 문헌조사와 위성영상을 통하여 파악하였다. 문헌조사 분석 결과, 경우 대부분 6~9월에 얇은 파괴에 의한 쇄설성 유동(debris flow)이 발생하였다. 대부분의 산사태는 강우에 의하여 발생하지만, 지질, 토질, 식생 등 내재적원인으로 인하여 지역마다 차이를 보이기 때문에 그 기작에 대한 분석이 필요하다. 위성을 이용해서 산사태를 파악하는 방법은 피복의 분류에 의하여 실시하였으나 Landsat7의 해상도가 낮아서 우리나라에서 발생하는 소규모의 산사태를 분류하기에는 어려움을 보였고 그 정확도가 20%에 그쳤다. 따라서 낮은 해상도를 가지는 영상에 의한 산사태의 현

황 파악을 위해서는 추후 더 많은 연구가 필요하다.

5. 국외 산사태 발생현황은 문헌조사를 통하여 실시하였으며, 중국, 일본, 홍콩에 대상으로 조사하였다. 중국의 경우, 중국 남부에서 발생한 사건과 남동쪽 국가인 티벳 등 몇 가지 사례를 분석하였다. 하지만 일부 지역만을 분석하였기 때문에 국가적 차원의 경향을 파악할 수 없다는 한계점을 가지고 있다. 일본의 경우, 전 국토에서 전반적으로 일어나는 일반적 산사태를 분석하였으며, 전국적인 지질 및 기후 조사를 하였다. 일본은 태평양지대에 속하여 있기 때문에 다른 국가에 비해 지진의 영향을 많이 받는 산사태의 발생이 두드러진다. 홍콩은 주요한 5개 산사태를 통하여 그 특성을 파악하였다. 홍콩의 경우, 좁은 영토의 토지의 효율적 이용을 위하여 산지개발이 활발히 이루어 졌기 때문에 산사태 발생에 의한 피해가 크게 발생하였다. 따라서 산사태 발생 및 피해 경감 대책에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

제 4 장 대상지 선정 및 현장 모니터링

제 1 절 서론

본 과제를 수행함에 있어 연구지역을 선정하기 위해 현장조사를 실시하였다. 현장조사 지역은 산사태의 발생빈도와 피해 사례, 거리와 비용 등 제반 요건들을 검토하여 경기도 안성지역과 경기도 장흥지역으로 선정하였다. 조사 목적은 연구지로의 적합 여부를 판단하기 위한 것으로 산사태 규모, 유형 등 산사태 발생 특성과 접근성, 자연사면 여부, 지속적인 피해 위험성 등을 중심으로 조사하고 대상지를 선정하고자 한다.

현장 조사를 통하여 선정된 지역은 자연사면으로 이는 그 규모가 크기 때문에 실내에서 현장을 모사하는 것은 대단히 어려우며 막대한 비용과 대규모 실험실이 필요하기 때문에 현실적으로 불가능하다. 따라서 실제 거동을 분석하기 위해 계측기를 설치하여 현장 모니터링을 수행함으로써 현장을 모사할 수 있는 자료를 수집하고자 한다. 또한 실내 시험과 현장 계측 자료의 상관성 분석을 통하여 실내 시험의 문제점을 파악하고 현장 자료로의 활용 방안을 모색하기 위함이며, 이론적 해석을 통한 결과를 검증하고 보충하기 위함이다. 이론적으로 현장을 모사하는 것은 그 특성상 많은 가정이 필요하게 되기 때문에 현장을 완벽히 모사할 수 없다. 따라서 현장 계측 자료를 통해 가정의 타당성을 검증하고 해석의 결과를 보정, 검증하여 그 적용의 가능성을 확인해야 한다.

산사태는 내적으로 취약한 지반에 외적인 요인이 작용함으로써 발생하게 된다. 따라서 내적 요인의 파악 또한 산사태를 해석함에 있어 매우 중요하다. 내적 요인인 지형과 토질, 지질 등을 파악하기 위해 대상지에서 시료를 채취하여 실내 시험을 통하여 기초물성을 파악하고자 하며, 시험굴 조사와 물리탐사인 비저항 탐사를 실시하여 지반 구조 및 지질을 조사하고자 한다.

산사태는 토양 함수비와 지하수위의 영향이 크고 이는 강우에 의해 좌우되기 때문에 강우에 따른 영향을 살펴보기 위하여 지속적인 모니터링이 필요하다. 따라서 지속적인 모니터링을 실시할 수 있는 지역을 선정하고 심도별 함수비와 지하수위의 데이터를 일정한 간격으로 수집하는 것이 필요하다.

제 2 절 대상지 선정

1. 현장조사

현장조사 지역 선정은 산사태의 발생빈도와 피해 사례, 거리와 비용 등 제반 요건들을 검토하여 경기도 안성지역과 경기도 장흥지역으로 선정하였다.

가. 경기도 안성지역

안성 지역의 경우 1991년 대규모 산사태가 발생하여 많은 피해를 발생시켰고, 매년 수차례 산사태가 보고되고 있으며 본 과제를 시작하는 2004년에도 수차례 산사태가 발생하였다.

1) 조사지역 선정

조사지역은 최근에 일어난 산사태에 대해 우선순위를 두고 선정하였으며 선정된 조사 지역은 다음과 같다.

표 4.1 조사지역 위치

구분	기호	위치	개소	발생 년도
1	Site-1	경기도 안성시 금광면 옥정리 옥정교 부근 야산	1	2004
2	Site-2	경기도 안성시 금광면 옥정리 이월고개 철탑관리임도	10여개	"
3	Site-3	"		"
4	Site-4	경기도 안성시 금광면 상중리 베틀고개 오르기 직전 야산	1	"
5	Site-5	경기도 안성시 금광면 오흥리	1	복구 완료
6	Site-6	경기도 안성시 금광면 사흥리 사간(논둑 유실)	1	2004
7	Site-7	경기도 안성시 일죽면 금산리 상산정동	1	2002

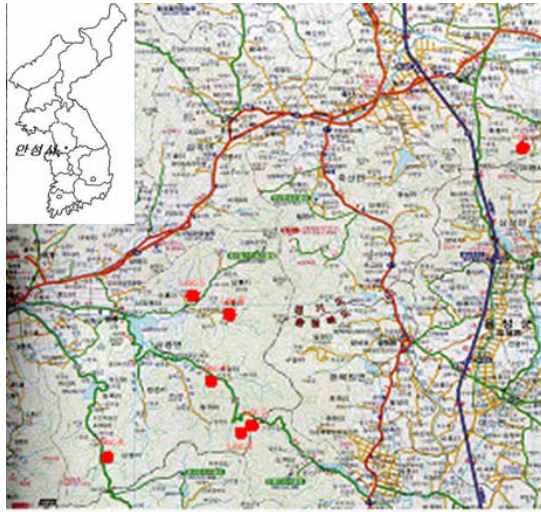


그림 4.1 현장 조사 지역 위치

2) 현장 조사 결과

가) Site-1



그림 4.2 Site-1

표 4.2 Site-1 조사 결과

Length (m)	21		Slope angle	약 40°	
Width (m)	Head	10.8	Failure depth (m)	Max.	1.8
	Center	10.7		Min.	0.5
	Toe	8.1		Avg.	1.15
Soil depth (m)	0.5~1.8		Ground water	없음	

산사태는 사면 상부에 보이는 묘지 관리임도에서 시작되었으며, 사태면에서는 기반암까지 노출되었다. 기반암은 심하게 풍화되어 손으로 만졌을 때 부스러졌으며 표토는 Sandy silt로 보인다. 식생은 사진에서 볼 수 있듯이 침엽수가 대부분이며 지하수는 보이지 않았다. 사태에 의한 피해는 논외 일부로써 미미하였다. 산사태 발생지까지의 접근성은 용이하지만 묘지에 관리임도에 의한 인공 사면의 파괴인 것으로 보이며 산지가 낮아 규모가 작고 지속적인 위험성은 없어 보인다.

나) Site-2, Site-3



그림 4.3 Site-2



그림 4.4 Site

표 4.3 Site-3 조사 결과

Length (m)	27		Angle	약 40°	
Width (m)	Head	6.9	Failure depth (m)	Max.	1
	Center	9.3		Min.	0.5
	Toe	3.5		Avg.	0.75
Soil depth (m)	0.5 ~ 2.5		Ground water	사태 toe에서 8m 아래 지점	

Site-2와 Site-3의 경우 모두 철탑 관리 임도에서 파괴가 일어났다. 위의 그림에서 볼 수 있듯이 Site-2의 경우 사면에 설치된 옹벽에서 파괴가 발생했다. Site-3의 경우 시설물의 파괴에 의한 것은 아니지만 역시 임도 설치에 의해 임도면으로부터 침투가 발생하여 파괴가 일어난 것으로 보인다. 옥정리의 경우 매년 산사태가 일어나지만 대부분 철탑관리 임도에서 일어나는 것이다. 사태가 일어난 사면의 주변 식생을 보면 작은 초목과 어린 잣나무가 대부분이었다. 이런 식생의 분포는 능선을 따라 분포한 소나무를 보면 임도 건설시 절·성토 사면의 식생 공법에 의한 것으로 보인다. Site-3의 경우 산사태 끝머리에서 8m 가량 밑에서 지하수위를 발견할 수 있었다.

다) Site-4



그림 4.5 Site-4

Site-4의 경우 사유림이었기 때문에 세밀한 조사는 불가능하였다. 사태는 사면과 평형한 얇은 파괴인 것으로 판단되며 규모가 매우 작았다.

라) Site-5



그림 4.6 Site-5



그림 4.7 Site-6

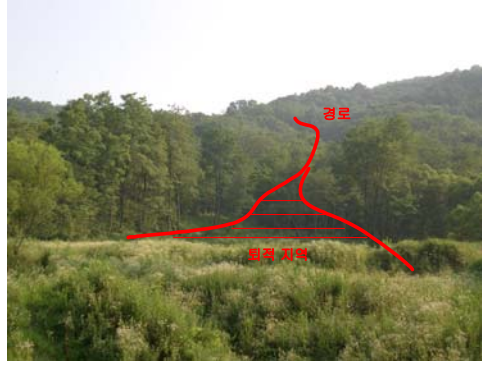


그림 4.8 Site-7

Site-5와 Site-7은 이미 복구가 완료되어 흔적만 찾아볼 수 있었으며, Site-6은 논둑의 일부가 무너져 내린 것이었다.

나. 경기도 장흥지역

장흥 지역의 경우 1996~1998년 대규모 산사태가 발생하였고 30명이 숨지는 등 산사태 피해가 컸으며 지속적인 위험성을 가지고 있다고 판단하여 현장 조사를 실시하였다.

1) 조사지역 선정

조사지역은 산사태 발생지의 시설물 근접여부와 접근성을 비교하여 선정하였다.

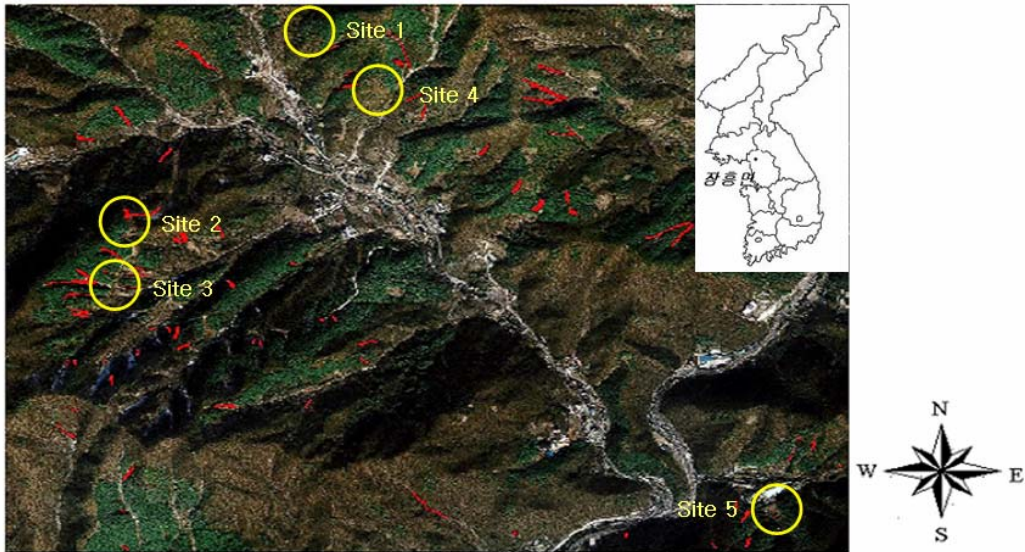


그림 4.9 답사지역 위치

2) 조사 결과

경기도 장흥 지역의 현장 조사 결과는 표 4.4와 같다

표 4.4 조사결과

구분	비고
Site-1	- 접근성 양호 - 산사태 발생지역임 - 개발중인 지역
Site-2	- 접근성 보통 - 산사태 발생지역(자연사면, 인공사면) - 산사태 발생시 임도피해 예상
Site-3	- 접근성 보통 - 산사태 발생지역(자연사면, 인공사면) - 산사태 발생시 임도피해 예상
Site-4	- 접근성 양호 - 산사태 발생지역 - 개발중인 지역(전원마을)
Site-5	- 접근성 양호 - 산사태 발생지역 - 산사태 발생시 피해는 크지 않을 것으로 판단 (사방시설 존재)



그림 4.9 현장 조사

다. 결론

현장 조사 결과 경기도 안성의 경우 매년 수차례의 산사태가 지속적으로 발생하기는 하나 시설물과 거리가 멀어 피해가 미비하고 대부분 인공 사면에서 발생하였으며 접근성이 용이하지 않다. 장흥 지역의 경우 대부분의 산사태가 자연 사면에서 발생하였으며 지속적인 개발 계획을 가지고 있어 산사태 발생 시 피해가 클 것으로 판단되었다.

2. 대상지 선정

연구 대상지 선정은 현장 조사 결과를 이용하여 본 과제와의 적합성, 위험성 및 피해 예상도, 접근성 등을 고려하여 경기도 양주시 장흥면을 선정하였다.

기존 연구들에 의하면 이 지역은 낮은 경사에서도 산사태의 발생가능성을 보이고 있으며 사면 능선을 따라 산사태 발생 위험률이 높은 것으로 나타났다(그림 4.10). 또한 현재 군부대 및 유원지가 위치하고 있으며 마을이 조성되는 등 개발이 진행되고 있어 산사태 발생 시 큰 피해가 우려되므로 연구의 필요성이 있다고 판단되며 대부분 자연 사면 파괴이므로 연구의 목적과 부합하기 때문에 연구지로 적합하다고 판단된다.

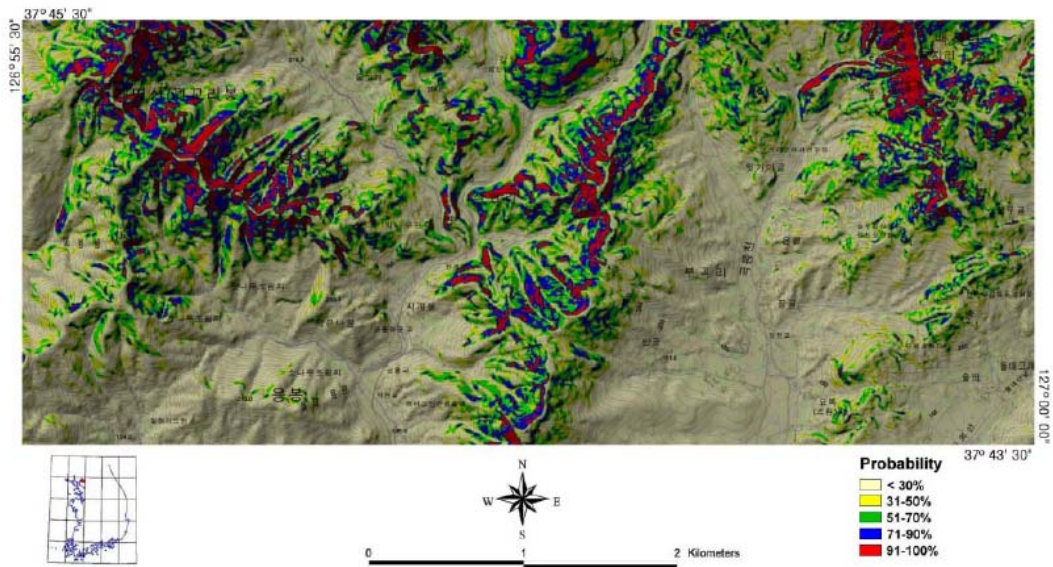


그림 4.10 경기 장흥 지역의 산사태 발생 가능성 지도 (한국지질자원연구원, 2003)

제 3 절 현장 모니터링

1. 계측기 매설

가. 목적

본 과제를 수행함에 있어 계측의 목적은 다음과 같다.

첫째, 현장의 거동 특성을 나타내는 자료를 수집하는 것이다. 자연 사면의 경우 그 규모가 크기 때문에 실내에서 현장을 모사하는 것은 대단히 어려우며 막대한 비용과 대규모 실험실이 필요하기 때문에 현실적으로 불가능하며 따라서 계측을 통하여 현장을 모사할 수 있는 자료를 수집하고자 함이다.

둘째, 실내 시험과 현장 계측 자료의 상관성 분석을 통하여 실내 시험의 문제점을 파악하고 현장 자료로의 활용 방안을 모색하기 위함이다.

셋째, 이론적 해석을 통한 결과를 검증하고 보증하기 위함이다. 이론적으로 현장을 모사하는 것은 그 특성상 많은 가정이 필요하게 되기 때문에 현장을 완벽히 모사할 수 없다. 따라서 현장 계측 자료를 통해 가정의 타당성을 검증하고 해석의 결과를 보정, 검증하여 그 적용의 가능성을 확인해야 한다.

넷째, 장기간의 자료 수집을 통해 사면의 장기적인 거동특성을 분석하고 산사태 요인을 규명하기 위함이다.

나. 계측 항목

1) 함수비 계측

함수비는 불포화토의 특성인 함수특성곡선과 강우 시 침투 거동에 영향을 주는 투수계수와도 직접적인 관련이 있으므로 장기적인 함수비의 계측은 사면의 거동을 분석하는데 매우 중요하다.

가) 계측장비

본 과제에서 함수비의 계측은 TDR 함수비 측정 장치와 TDR용 함수비 튜브를 이용하여 실시하였다. TDR이란 전기신호의 전도특성을 이용하여 토양 내 설치된 탐침(probe)의 전기신호 반향시간을 측정하는 기기로서 이 반향시간과 토양의 유전율상수(dielectric constant)의 관계를 이용하여 함수량을 추정한다. TDR에서 발생된 신호는 신호가 흐르는 매질의 임피던스(impedance)가 변함에 따라 신호의 반향(Reflectance)

정도가 달라지는 특성이 있으며, 토양에 탐침을 꽂아 함수량이 변하면 토양 내의 임피던스가 변함을 이용하여 토양함수량을 측정하게 된다.



(a) TDR 함수비 측정장치



(b) 함수비 튜브

그림 4.11 함수비 측정 장비

나) 설치 및 측정 방법

측정하고자 하는 지점을 보링한 후 함수비 튜브의 하부를 밀폐하여 지중에 매설한다. 매설이 끝난 후 튜브 상단을 마개를 이용하여 밀폐한 후 보링공과 튜브와 잘 밀착되도록 되메우기를 한 후 교란된 지반이 어느 정도 안정화될 때까지 수일간 방치한다. 지반이 어느 정도 안정화되면 측정을 실시하며 함수비 센서를 튜브에 관입시켜 깊이에 따른 함수비를 디지털 화면을 통해 읽는 방식이다.



(a) 보링 실시



(b) 함수비 튜브 삽입



(c) 되메우기



(d) 설치 마무리

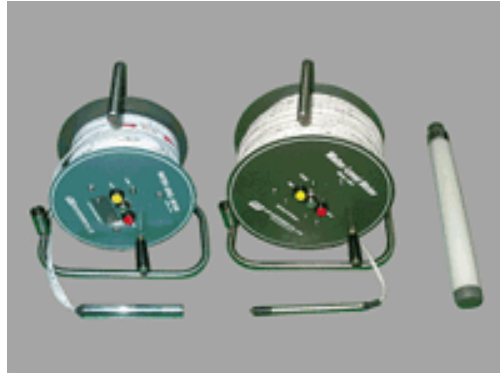
그림 4.12 합수비 계측 장비 설치

2) 지하수위 계측

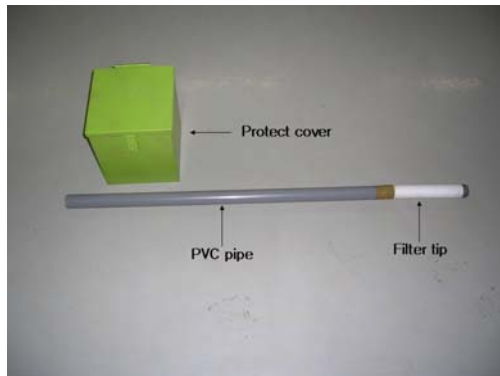
사면의 불안정을 유발하는 요인 중 지하수위 상승에 의한 공극수압의 증가이다. 본 과제에서는 강우 침투에 의해 발생하는 지하수위의 변동을 알아보기 위해 지하수위를 계측하고자 한다.

가) 계측장비

본 과제에서 지하수위 계측은 지하수위계와 Stand pipe를 이용하여 실시하였다. 지하수위계는 센서와 전기선으로 구성되어 있으며 센서는 물에 접촉하면 부저가 울리며 빨간색 전등이 점등하게 되어 있다. 따라서 지중에 설치된 Stand pipe에 센서를 삽입한 후 부저가 울리는 지점까지의 거리를 재어 지하수위를 측정하게 된다. Stand pipe는 하부에 지하수위가 유입되는 유입부가 있으며 토사 등의 유입을 방지하기 위해 Filter로 보호되어 있다.



(a) 지하수위계



(b) Stand pipe

그림 4.13 지하수위 계측 장비

나) 설치 및 계측방법

계측하고자 하는 지점을 보링한 후 Stand pipe를 삽입시킨다. 원활한 지하수의 유입 및 토사 등에 의한 Filter의 막힘을 방지하기 위해 pipe와 보링공 사이를 표준사로 되메운 후 지표부근에서 소정의 깊이까지 시멘트 풀로 채워 강우와 지표수의 침투를 방지한다. 본 과제의 경우 시멘트 풀 대신 Protect cover를 이용하여 설치를 마무리하였다.



(a) 보링 실시



(b) Stand pipe 삽입 및 되메우기



(c) Protect cover 설치



(d) 설치 마무리

그림 4.14 지하수위 계측 장비 설치

3) 강우자료 수집

강우는 산사태를 유발하는 인자 중 가장 중요한 요인이므로 강우자료의 수집 또한 매우 중요한 항목이라 하겠다.

가) 수집방법

강우 자료의 수집은 시우량 자료가 구축되어 있는 관측소를 조사한 후 티센망(Thiessen Network)을 작성하여 연구지역을 포함하는 관측소를 결정하였다. 시우량 자료는 온라인을 통해 자료를 제공하는 수자원 종합정보의 홈페이지를 통하여 수집하였다. 티센망 작성 결과 연구지를 포함하는 관측소는 건설교통부가 운영하는 의정부관측소로 조사되었다.



그림 4.15 강우자료 수집을 위한 Thiessen Network 작성

나) 수집자료

수집된 자료는 시우량 자료로서 1995년 6월 1일부터 현재까지의 자료를 획득하여 Microsoft사의 Excel 프로그램을 이용하여 DB를 구축하였다.

다. 결론

국내 산사태의 대부분은 강우 침투에 의해 발생하며, 강우 침투를 현장 모니터링하기 위해 함수비와 지하수위 계측기를 연구 대상지인 장흥지역에 매설하였다.

2. 현장 지층분석을 위한 지반조사(물리탐사)

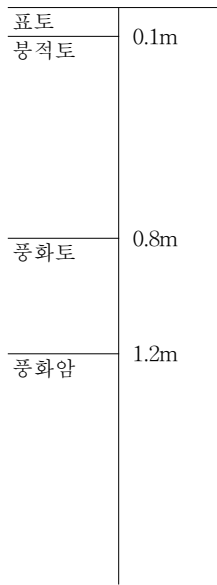
가. 시료채취와 시험굴 조사

자연 사면을 구성하고 있는 재료들의 공학적 특성을 규명하기 위해 불교란 시료를 채취하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서 시료의 채취 방법은 블록채취(Block sampling)을 통해 자연 사면의 불교란 시료를 채취하였다. 그림 4.16은 불교란 시료의 채취 모습을 나타낸다.

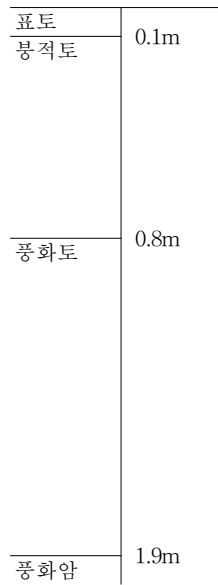


그림 4.16 불교란 시료 채취

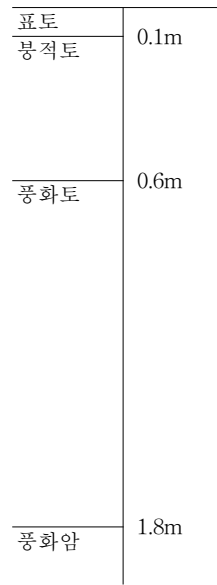
상부 토층분포를 파악하고 사면안정 해석의 기초자료로 활용하기 위한 목적으로 Test pit 및 핸드오거보링(hand auger boring)을 수행하였다. 각 조사는 블록채취를 위치한 지점과 동일한 지점에서 수행하였다. Test pit 및 핸드오거보링 성과에 의하면 생성기원 및 층서에 따라 잔적토층 및 기반암층 등으로 구성된 성층구조이다. 잔류토층은 기반암이 오랜 지질시대를 통하여 풍화작용을 받아 흙으로 변하여 원위치에 잔류하고 있는 지층이다. 그림 4.17는 각 지점의 토층분포를 보여준다.



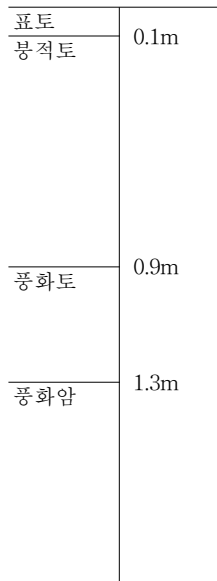
(a) JH 2-1



(b) JH 2-2



(c) JH 2-3



(d) JH 1

그림 4.16 각 지점 토층 profile

나. 기초물성시험

대상 지역 지반의 공학적 특성을 분석하여 자연사면의 재해 예측의 해석 기초 자료로 활용하기 위하여 기본물성시험을 실시하였다. 표 4.5에 각 토층의 물리적인 특성이며 그림 4.18은 각 시료에 대한 입도분포곡선을 나타낸다.

표 4.5 각 토층의 물리적인 특징

Site	토층	비중	현장 단위중량 (ton/m^3)	건조 단위중량 (ton/m^3)	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수	흙의 분류
JH 1	표토	2.68	1.85	1.51	N.P	N.P	-	SC
	붕적토	2.65			N.P	N.P	-	SC
	풍화토	2.70			N.P	N.P	-	SC
JH 2-1	표토	2.67	1.40	1.11	30.84	19.95	10.89	SC
	붕적토	2.66			30.60	20.45	10.15	SC
	풍화토	2.65			28.84	24.72	4.12	SC
JH 2-2	표토	2.64	1.62	1.35	32.41	29.18	3.23	SC
	붕적토	2.64			28.94	24.76	4.18	SC
	풍화토	2.70			N.P	N.P	-	SC
JH 2-3	표토	2.60	1.57	1.24	25.27	20.46	4.82	SC
	붕적토	2.68			23.92	20.69	3.23	SC
	풍화토	2.69			N.P	N.P	-	SC

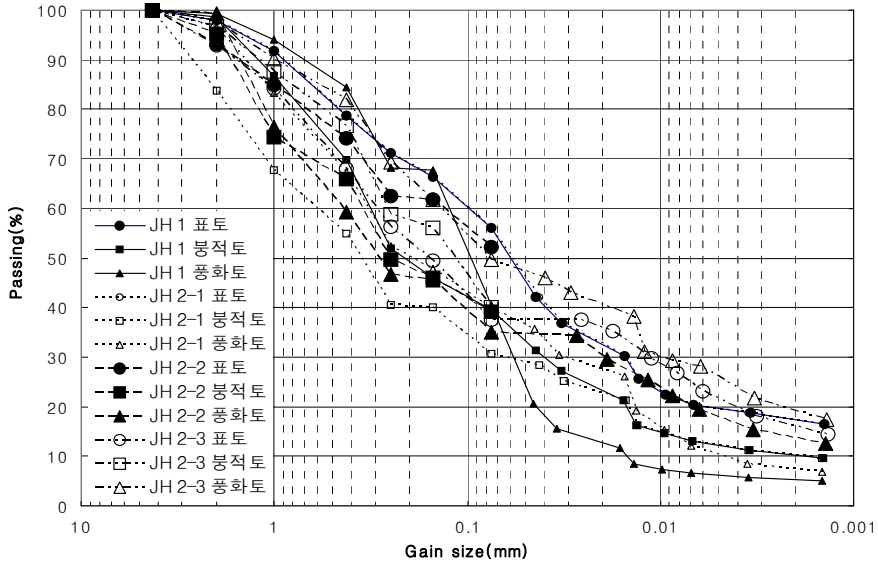


그림 4.18 각 시료의 입도분포곡선(장흥)

다. 지층의 물리탐사

1) 목적

전기 비저항 탐사는 국내에서 가장 성공적으로 적용되고 있는 물리탐사 기술의 하나로서 최근에는 적용 분야에 있어서도 기존의 지하자원조사, 온천 및 지하수 조사, 지질조사 등의 목적을 넘어서서 도로, 교량, 대형구조물 건설을 위한 토목공사나 지반침하 안정성 평가 등의 지반조사 분야 및 쓰레기 매립장 오염조사, 폐광 지역 조사 등의 환경 분야에까지 확대일로를 걷고 있다. 이에 본 연구에서는 지구물리탐사의 일종인 전기 비저항 탐사를 통해 연구 지역 지층의 상태를 파악하는 것을 목적으로 한다.

2) 전기비저항 탐사 배경 이론

가) 전기비저항 탐사 개요

암석이나 광물의 전기 전도도 측정은 18세기 중엽부터 이루어졌으나, 근대적 의미로의 전기탐사는 1912년 프랑스의 슬럼버저(Conrak Schlumberger)에 의하여 단일 전류 전극에 의한 등전위의 분포가 성공적으로 측정됨으로써 최초로 시작되었다. 전기 비저항탐사는 매우 역사가 깊으며 가장 널리 사용되는 물리탐사 기술의 하나로서 특히 지하수 및 지하자원의 탐사에 널리 사용되어 왔다. 최근에는 단순한 이상대의 확인이 아

닌 지하구조를 영상화하는 것으로 확대, 발전되면서 토목 및 환경 분야 그리고 단층대 탐지와 같은 분야에 많이 적용되고 있다. 전기비저항 탐사는 측정방법(전극의 배열방법) 및 해석방법에 따라 약간의 차이가 있다. 전극의 배열방법 및 조사현장의 조건에 따라 Pole-pole 배열, Pole-dipole 배열, Dipole-dipole 배열, Wenner 배열, Schlumberger 배열 등의 전극배열법을 사용하여 수평탐사 및 수직탐사를 수행한다. 최근에는 탐사장비의 발달로 인해 수평탐사와 수직탐사를 조합·병행하는 탐사기법이 개발되면서 2차원 및 3차원 전기비저항 탐사, 비저항 영상법 및 고밀도 전기탐사법이라고 불리며, 획득된 측정 자료는 역산모델링을 실시하여 2차원, 또는 3차원 단면영상을 구한다.

본 현장에서는 지반의 수평적인 성분을 관찰하기위해 Wenner-Schlumberger 배열방법을 사용하여 2차원 전기비저항 탐사를 실시하였다.

나) 전기비저항 탐사의 원리 및 방법

(1) 원리

지하의 전기적인 물성의 차이에 의한 반응을 지표에서 측정하여 지하 구조를 영상화시키는 모든 방법을 큰 의미의 전기탐사라 한다. 전기 비저항법은 전류 전극과 전위 전극을 이용하여 지하매질의 전기 비저항 분포를 알아내는 방법이다.

임의의 물체 양단에 일정한 전압을 걸어주면 어떤 물체는 많은 양의 전류를 흘려보내 주지만 어떤 물체는 훨씬 적은 양의 전류밖에 흘려보내지 못한다. 우리는 이 전류를 흐르지 못하게 하는 특성을 그 물체의 전기 저항(R)이라 하는데, 만약 그림 4.19와 같은 도선에 전류를 흘려 보내주면 도선은 그 도선을 이루는 물체의 성질과 길이 L에는 비례하고 단면적 A에는 반비례하는 전기 저항을 갖게 된다. 즉,

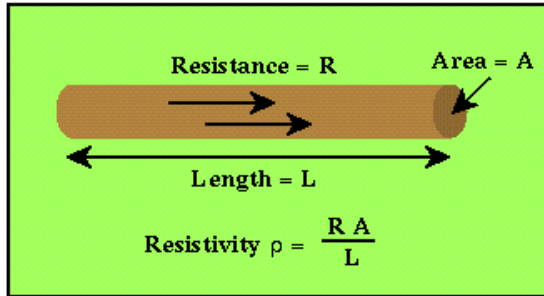


그림 4.19 저항과 전류의 관계

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4.1)$$

여기서 ρ 는 비저항으로서 물체의 모양, 크기에는 관계없는 물체의 전기적 특성을 나타내는 것으로 이를 전기 비저항(resistivity)이라 하며, 단위는 $\Omega - m$ 가 된다. 즉 전기 비저항이란 단위체적 물질이 갖는 저항이라고 정의할 수 있다.

지구의 내부를 이루고 있는 흔히 우리가 땅속이라 부르는 곳은 여러 가지 종류의 암석으로 구성되어 있다. 이 암석들은 암석의 공극률(Porosity), 공극내의 유체의 성질, 유체의 포화도(saturation), 조암광물의 종류, 암석 구성 입자의 크기 및 성질, 암석의 고화도 등, 암석 자체의 성질과 파쇄대, 균열대, 단층 등의 외부적인 요인에 의해 자연 상태에서 각기 다른 전기 비저항 값을 갖게 된다. 전기 비저항 탐사에서는 이러한 지하의 전기 비저항 분포를 알아내서 지하구조를 규명하게 된다.

앞서 설명한 것처럼 걸어준 전압과 흐르는 전류는 서로 비례하는 성질(옴의 법칙)이 있는데 즉, 걸어주는 전압이 크면 클수록 흐르는 전류량은 많아지게 된다. 옴의 법칙을 수식으로 표현하면

$$V = I R \quad (4.2)$$

이 되며, 식(4.1)과 식(4.2)을 연립해서 풀면 전기 비저항은

$$\rho = \frac{A}{L} R = \frac{A}{R} \frac{\Delta V}{I} \quad (4.3)$$

로 표현된다.

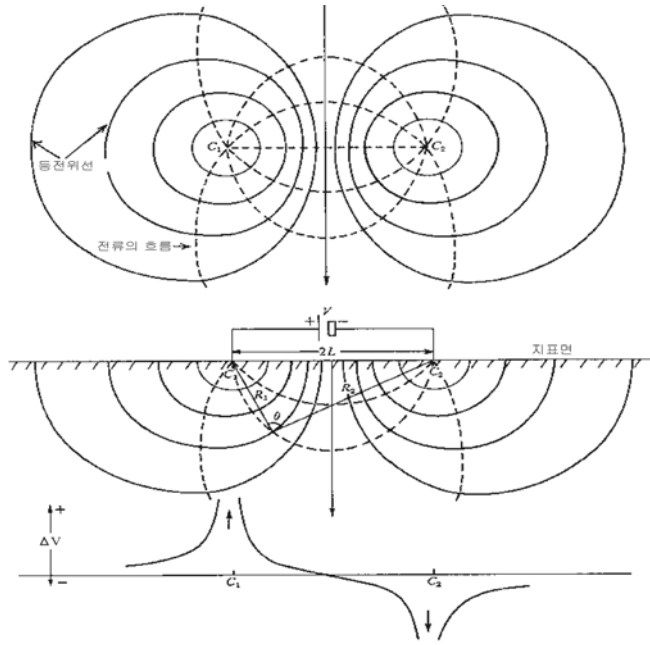


그림 4.20 전류 및 등전위선 분포

즉, 우리는 땅속에 일정한 전류 I 를 흘려보낸 후 전위차 (ΔV) 를 측정하는 방법으로 지하 매질의 전기 비저항 분포를 알아낼 수 있다. 이 원리를 간단히 도시한 것이 그림 4.20이다.

전류의 흐름을 2차원적인 지하구조를 가정하여 생각해 보면 반원상에 방사상으로 흐르게 되므로 식(4.3)은

$$\rho = 2\pi r \frac{\Delta V}{I} \quad (4.4)$$

와 같이 바꿔 쓸 수 있다. 이때 전류 전극 C_1 에는 $+I$ 의 전류를 C_2 에는 $-I$ 의 전류를 가정하면 식(4.4)에 의해 전극 P_1, P_2 에서는 각각

$$V_{p1} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{+I}{C_1P_1} + \frac{-I}{C_2P_1} \right) \quad V_{p2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{+I}{C_1P_2} + \frac{-I}{C_2P_2} \right) \quad (4.5)$$

와 같은 전위가 걸리게 되고, 따라서 전류 전극 C1, C2에 의해서 생기는 전위 전극 P1, P2에서의 전위차는

$$\Delta V = V_{P1} - V_{P2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} + \frac{1}{C_2 P_2} \right) \quad (4.6)$$

가 된다. 이것을 비저항 식으로 나타내면

$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} + \frac{1}{C_2 P_2} \right)} \frac{\Delta V}{I} = K \frac{\Delta V}{I} \quad (4.7)$$

가 된다. 식(4.7)에서 K는 기하학적 계수(geometric factor)로서 전류 전극과 전위전극의 배열에 의해서만 결정되는 값이 된다. 따라서 전극 배열에 따라 K 값을 계산하고 흘려주는 전류량에 대한 전압차($\Delta V/I$)를 측정함으로써 겉보기 전기 비저항(ρ_a)을 계산할 수 있다.

(2) 방법

전기비저항 탐사는 그 탐사 목적에 따라 통상적으로 수평탐사와 수직탐사로 분류된다. 수평탐사는 전류전극 및 전위전극의 간격을 고정시킨 상태에서 전체 전극을 정해진 축선에 따라 이동시켜 가며 탐사를 수행함으로써 지하구조의 수평적인 변화를 조사하는 것을 말한다. 반면 수직탐사는 전류 및 전위전극의 중심은 고정시킨 상태에서 그 간격을 증가시켜 가며 깊이 변화에 따른 반응양상의 변화를 고찰함으로써 수직적인 전기비저항 분포 양상을 조사하는 방법이다. 최근에는 탐사장비의 발달로 인해 수평탐사와 수직탐사를 한꺼번에 수행할 수 있는 탐사기법이 개발되었다. 이러한 이유로 전기비저항 탐사에서는 탐사 목적에 합당한 전극배열 방식의 적절한 선택이 중요하다.

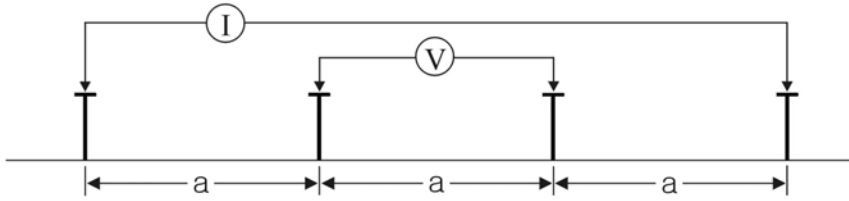


그림 4.21 Wenner 배열의 모식도

국내 지질환경은 전기비저항이 외국에 비해 수백 ohm-m 이상으로 매우 높아 국내에서의 전기비저항 탐사에서는 Wenner 배열이나 Schlumberger 배열을 이용한 전기비저항 탐사가 많이 행해진다.

본 탐사에서는 Wenner-Schlumber 배열을 이용하여 수평탐사를 수행하는 2차원 전기비저항 탐사를 실시하였다. 특징은 전류전극간격과 전위전극간의 간격이 등간격이다. $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = na$ 인 경우로서, 거리계수 $G = a$ 가 되므로 겉보기 비저항치는 0이다.

$$\rho_a = \pi \cdot n(n+1) \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{\gamma_1} - \frac{1}{\gamma_2}\right) - \left(\frac{1}{\gamma_3} - \frac{1}{\gamma_4}\right)} \quad (4.8)$$

$$\rho = \pi n(n+1)a \frac{\Delta V}{I} \quad (4.9)$$

이다. 이 배열에서는 거리계수가 a 이므로, 전기비저항 산출식이 가장 간단하여 계산이 쉬우며, 또한 현장 작업에서도 전극배열이 쉬운 장점이 있는 반면, 전극 4개를 모두 이동시켜야 하는 불편이 있다.

그림 4.22는 Wenner 배열에 의한 겉보기 비저항 측정 단면을 도시한 것이다.

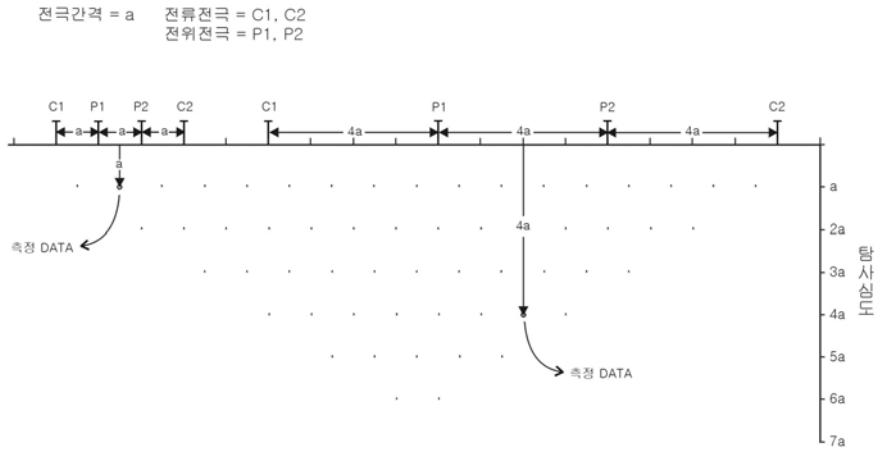


그림 4.22 Wenner array에 의한 2차원 전기비저항 탐사 개념도

전기비저항 탐사는 전류전극 및 전위전극의 위치에 따라 5~6개의 배열방법이 있다. 전형적으로 적용되는 웨너배열, 슬림버저배열, 쌍극자배열에 대한 장단점은 표 4.6과 같다.

표 4.6 전기비저항탐사 배열방법에 따른 비교

구 분	wenner 배열	schlumber 배열	dipole-dipole 배열
배열법	<p style="text-align: center;">C₁ P₁ P C₂</p>	<p style="text-align: center;">C₁ P₁ P C₂</p>	<p style="text-align: center;">C C P₁ P₂</p>
현 장 적용성	<ul style="list-style-type: none"> C₁, C₂, P₁, P₂ 각각의 전극이 함께 움직이므로 현장적용성 분리 ⇒ 다중전극적용 	<ul style="list-style-type: none"> P₁, P₂를 고정하고 C₁, C₂를 이용하며 측정되므로 현장성 적용양호 	<ul style="list-style-type: none"> C₁, C₂, P₁, P₂ 각각의 전극이 함께 움직이므로 현장적용성 분리 ⇒ 다른전극적용 (multi channel)
단 점	<ul style="list-style-type: none"> Multi channel을 적용하지 않는 경우 탐사시간이 많이 소요 약간의 지형적오차 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 측점간 이용이 번거로워서 수평탐사에 부적합 	<ul style="list-style-type: none"> Multi channel을 적용하지 않는 경우 탐사시간 많이 소요 지형적 영향을 심하게 받음 단심도 탐사
장 점	<ul style="list-style-type: none"> 전기비저항 계산이 쉬우며 전극간격이 등간격이므로 전극배열이 쉬움 수평탐사에 적합 	<ul style="list-style-type: none"> 수직탐사에 적합 수직적 불연속면 인지에 탁월함. 장심도탐사에 적합 	<ul style="list-style-type: none"> 해상도가 좋음 전극간격이 등간격이므로 전극배열 쉬움 수평탐사에 적합

· * 다중전극배열을 통해 전기비저항탐사를 이행함.

(3) 자료해석

측정 자료로부터 정확한 지하 비저항 분포를 알기 위해서는 컴퓨터에 의한 해석 프로그램이 절대적으로 필요하다. 컴퓨터를 이용한 정량적인 해석방법으로 역산(Inversion)을 이용하게 된다. 역산이란 가상적인 2차원적 지하 전기 비저항 모형을 설정한 후 이에 의한 외견비저항 단면도를 작성하여 현장 탐사자료와 맞추는 방법을 컴퓨터가 반복적으로 수행하여 가상 모형에 의해 계산된 외견비저항 단면도와 현장 측정 결과 얻어진 외견비저항 단면도 사이의 오차를 최소화시키게 된다. 이러한 과정을 허용 오차범위 이하가 될 때까지 반복수행하며, 이렇게 허용 오차 범위 내에 들어가는 가상 모형에 대하여 우리는 실제 지하 비저항 분포가 이와 같다고 해석하게 된다. 대부분의 역산 결과는 외견비저항 단면도에 나타난 양상과는 많이 다른 결과를 보여줌으로 외견비저항 단면도만 가지고 정성적으로 해석하는 것은 상당히 위험하며 역산(Inversion)과 같은 해석과정을 거쳐 정량적으로 분석하는 것이 중요하다.

측정 자료는 FDM 또는 FEM 기법을 이용한 비저항 역산 모델링에 의하여 2차원 영상처리가 되며 지질구조 및 지반의 특성에 의해 고비저항 혹은 저비저항의 이상대가 나타나게 된다. 이번 탐사에서 획득한 2차원 전기 비저항 탐사자료는 Lock(1995)에 의해 개발된 RES2DINV VER 3.4b 해석 프로그램을 이용하여 지하 지질구조에 대한 2차원 모델을 결정하였다.

표 4.7 화성암, 변성암, 퇴적암의 전기비저항(Telford 등)

구 분	암 종	전기비저항 범위(Ω -m)
화 성 암	화강암	3×102~106
	화강반암	4.5×103(습윤시)~1.3×106(건조시)
	섬장암	102~106
	섬록암	104~105
	석영반암	3×102~9×105
	석영섬록암	2×104~2×106(습윤시)~1.8×105(건조시)
	석영안산암	2×104(습윤시)
	안산암	4.5×104(건조시)~1.7×102(습윤시)
	휘록반암	103(습윤시)~1.7×105(건조시)
	반려암 현무암	103~106 10~1.3×107(건조시)
변 성 암	편암(석회질및운모)	20~104
	점판암(여러종류)	6×102~4×107
	편마암(여러종류)	6.8×104(습윤시)~3~106(건조시)
	대리석	102~2.5×108(건조시)
	규암(여러종류)	10~2×108
퇴 적 암	세일(응고된)	20~2×103
	역암	2×103~104
	사암	1~6.4×108
	석회암	50~107
	점토(습윤시)	20
	점토류	1~100
	층적층 및 모래	10~800

2) 지형 및 지질

물리탐사가 수행된 조사지역은 경기도 양주시 장흥면 석현리에 해당하는 지역으로서 이 지역은 지구구조적으로 주로 선캄브리아기에 속하는 경기변성암복합체로 주로 화강암질 편마암으로 되어 있으며 부분적으로 호상편마암 혹은 반상변정편마암이 분포하고

있다. 대부분 풍화가 심하게 진행되어 곳곳에서 작은 강우에도 쉽게 무너지는 현상을 나타내고 있다.

3) 방법

탐사 구간의 연장은 약 120m이며 지반 지질조사 계획을 기초로 하여 전기비저항 탐사의 electrode 간격은 5m로 결정하였다. 전극배열은 수직, 수평 탐사를 동시에 수행하는 효과를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있고, 그 결과 2차원 해석이 용이하도록 가단면도를 형성 할 수 있는 웨너-슐럼버저(Wenner-Schlumberger)배열을 이용하였다.

일반적으로 산악지형은 지하수면이 상당히 낮고 산림이 울창한 관계로 전극을 지표면에 꽂을 때 세심한 주의가 필요하다. 또한, 인공적, 자연적 요인으로 통상 지하에 몇 십 mV의 자연전위(self-potential)가 항상 존재하므로 이에 대한 적절한 보정과 함께 측정 시 자연 전위 변화 양상에도 주의를 기울여야 한다. 자연 전위가 측정 점에서 큰 값을 보이는 경우, 인접한 지점을 살펴보고 접지 등 다른 인위적 요인에 의한 것인지 확인하는 작업이 필요하며 무엇보다 잡음을 극복하기 위해서 가능한 많은 전류를 흘려보낼 수 있도록 해야 한다.

본 연구의 전기비저항 탐사 수행을 위하여 사용된 측정 장비는 체코 Geofyzika사의 ResiStar RS-100M 전기비저항 탐사기이다.

4) 결과

본 지역의 지하수위계와 시료 샘플링을 실시한 지점 부근에서 측정하였으며, 구간 총 연장은 약 120m 이다. 그림 4.23은 본 조사에서 얻어진 탐사 결과를 나타낸 것이다. 그림 2의 상단은 현장에서 구한 겉보기 전기비저항 자료의 가단면도이다. 파란색은 낮은 전기비저항을, 붉은 색으로 갈수록 높은 전기비저항 값을 나타낸다. 그림 4.23의 하단은 측정된 겉보기 비저항 자료를 토대로 구한 2차원 전기비저항 분포도이며 지형효과를 고려하여 도시한 해석단면이다. 그림 4.23을 통해 지형을 고려한 2차원 지하구조 해석 단면을 전체적으로 보면 지표면 부근에서 대체적으로 $5000\Omega m$ 이상의 비저항 값을 갖는다. 탐사구간의 측정값이 계곡으로 내려갈수록 지표면에서 상당히 고비저항 지역이 나타나는데 이는 노두가 돌출한 지역과 비교적 일치되고 있다. 통상적으로 저비저항대라 함은 약 $1000\Omega m$ 미만의 비저항을 가지는 경우를 의미하므로, 역산결과인 지하구조 해석단면 그림 4.18의 하단에서 측정점 5~11과 측정점 13~14지점에 약간의 지하수 유입이 있는 것으로 판단된다.

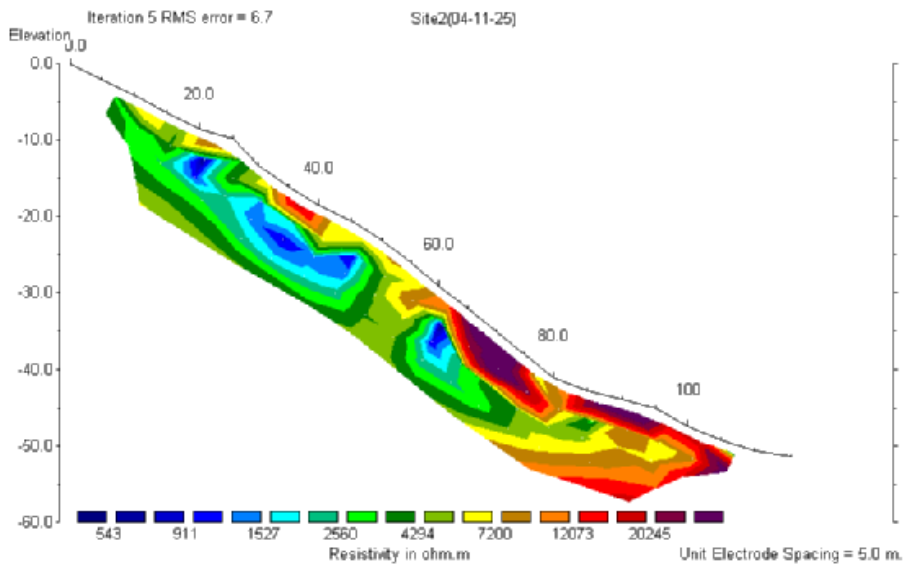
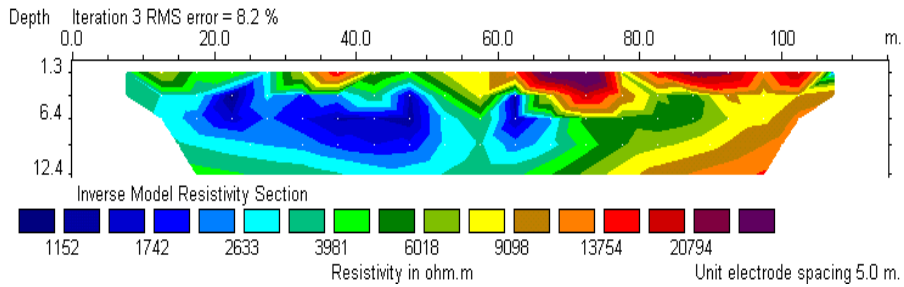


그림 4.23 전기비저항 탐사 해석단면 가단면도 및 해석단면

5) 결론

본 연구 지역의 조사 대상 지역의 지층 분포를 파악하기 위해 물리탐사의 일종인 비저항탐사를 수행하였다. 탐사 지층에 지하구조 해석단면 측정점 5~11과 측정점 13~14지점에 약 $1000\Omega m$ 미만의 비저항 값을 가지는 비저항대를 형성하므로 이 지점에 지하수 유입이 있는 것으로 판단된다.

제 3 절 지속적인 현장 모니터링 및 지반조사

1. 지속적인 현장 모니터링

가. 지하수위 계측

1) 목적

지하수위 상승에 의한 공극수압의 증가는 사면의 불안정을 유발하는 요인 중 하나이다. 따라서 강우 침투에 의해 발생하는 지하수위의 변동을 지속적으로 알아보기 위해 지하수위를 지속적으로 계측하였다.

2) 계측방법

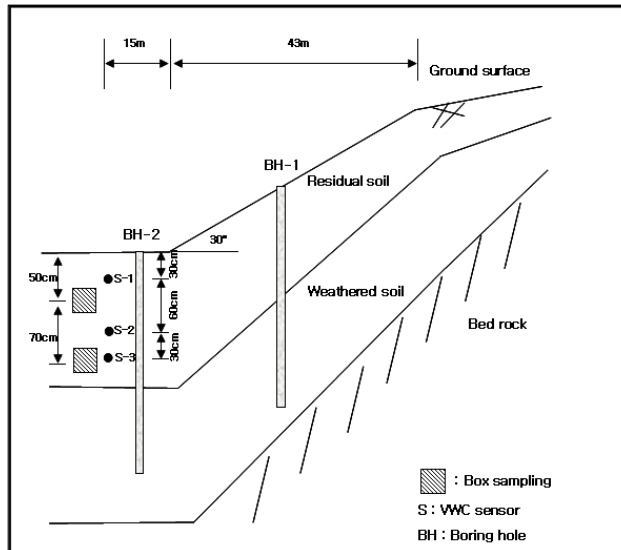


그림 4.24 현장 계측장비 매설 및 샘플링 위치

그림 4.24에 나타난 바와 같이 사면의 중부(B-1)와 하부(B-2)에 Stand pipe를 매설하고 지하수위계 센서를 설치하여 지표면에서부터 지하수위까지의 거리를 시간별로 측정한다.



그림 4.25 지하수위관의 매설

3) 계측결과

2005년 9월 27일부터 2005년 12월 22일까지의 지하수위 변화를 측정한 결과는 그림 4.26에 나타낸 바와 같으며 의정부지역의 강우강도와 비교하여본 결과 강우가 발생한 후에 지하수위가 상승한 것을 확인할 수 있었다. 특히, 9월 30일 강우강도 81mm/day의 강우가 온 후에 다음 날인 10월 1일의 지하수위가 약 1.5m 상승한 것으로 나타났다. 강우가 끝난 후에는 지하수위가 다시 천천히 하강하여 약 GL(-) 7.15m 정도의 값을 나타내었다. 9월 30일 이후의 낮은 강우에 대해서는 하부에서는 약간의 지하수위 상승을 보였으나 상부에서는 강우로 인한 지하수위 상승이 나타나지 않았다.

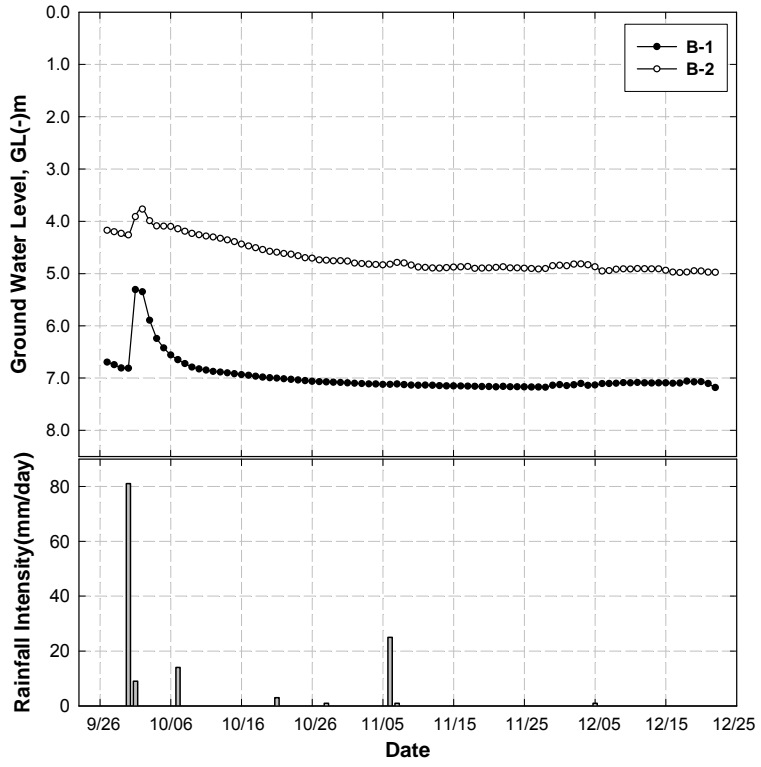


그림 4.26 강우 침투에 의한 지하수위 변동

표 4.8 날짜별 지하수위 및 강우강도

날 짜	지하수위 B-1 GL(-)m	지하수위 B-2 GL(-)m	강우강도 (mm/hr)	날 짜	지하수위 B-1 GL(-)m	지하수위 B-2 GL(-)m	강우강도 (mm/hr)
2005-09-27	6.70	4.17	0	2005-11-10	7.14	4.88	0
2005-09-28	6.74	4.20	0	2005-11-11	7.14	4.88	0
2005-09-29	6.81	4.23	0	2005-11-12	7.14	4.90	0
2005-09-30	6.81	4.26	81	2005-11-13	7.15	4.90	0
2005-10-01	5.31	3.91	9	2005-11-14	7.15	4.89	0
2005-10-02	5.35	3.77	0	2005-11-15	7.15	4.88	0
2005-10-03	5.89	3.99	0	2005-11-16	7.15	4.87	0
2005-10-04	6.24	4.09	0	2005-11-17	7.16	4.87	0
2005-10-05	6.42	4.09	0	2005-11-18	7.16	4.90	0
2005-10-06	6.56	4.10	0	2005-11-19	7.16	4.90	0
2005-10-07	6.65	4.14	14	2005-11-20	7.16	4.89	0
2005-10-08	6.72	4.19	0	2005-11-21	7.17	4.88	0
2005-10-09	6.79	4.23	0	2005-11-22	7.16	4.87	0
2005-10-10	6.83	4.26	0	2005-11-23	7.17	4.89	0
2005-10-11	6.85	4.28	0	2005-11-24	7.17	4.89	0
2005-10-12	6.87	4.30	0	2005-11-25	7.17	4.90	0
2005-10-13	6.89	4.33	0	2005-11-26	7.17	4.90	0
2005-10-14	6.90	4.36	0	2005-11-27	7.17	4.91	0
2005-10-15	6.92	4.39	0	2005-11-28	7.18	4.90	0
2005-10-16	6.93	4.44	0	2005-11-29	7.14	4.85	0
2005-10-17	6.95	4.47	0	2005-11-30	7.13	4.84	0
2005-10-18	6.97	4.51	0	2005-12-01	7.15	4.85	0
2005-10-19	6.98	4.54	0	2005-12-02	7.13	4.82	0
2005-10-20	7.00	4.58	0	2005-12-03	7.11	4.82	0
2005-10-21	7.00	4.59	3	2005-12-04	7.14	4.83	0
2005-10-22	7.01	4.62	0	2005-12-05	7.13	4.87	1
2005-10-23	7.03	4.63	0	2005-12-06	7.11	4.95	0
2005-10-24	7.04	4.66	0	2005-12-07	7.11	4.95	0
2005-10-25	7.05	4.70	0	2005-12-08	7.10	4.92	0
2005-10-26	7.06	4.71	0	2005-12-09	7.09	4.91	0
2005-10-27	7.07	4.74	0	2005-12-10	7.09	4.91	0
2005-10-28	7.07	4.75	1	2005-12-11	7.09	4.90	0
2005-10-29	7.08	4.76	0	2005-12-12	7.09	4.91	0
2005-10-30	7.09	4.76	0	2005-12-13	7.09	4.91	0
2005-10-31	7.09	4.76	0	2005-12-14	7.09	4.91	0
2005-11-01	7.10	4.80	0	2005-12-15	7.09	4.94	0
2005-11-02	7.11	4.81	0	2005-12-16	7.10	4.97	0
2005-11-03	7.11	4.82	0	2005-12-17	7.09	4.98	0
2005-11-04	7.11	4.83	0	2005-12-18	7.06	4.97	0
2005-11-05	7.12	4.83	0	2005-12-19	7.07	4.95	0
2005-11-06	7.12	4.82	25	2005-12-20	7.07	4.95	0
2005-11-07	7.12	4.79	1	2005-12-21	7.10	4.97	0
2005-11-08	7.13	4.80	0	2005-12-22	7.18	4.98	0
2005-11-09	7.14	4.84	0	-	-	-	-

4) 결론

지하수위를 관측한 결과 강우에 의한 지하수위 상승을 확인할 수 있으며 상부의 경우 일정 강우강도 이하에 대해서는 지하수위의 변동이 없었는데 이것은 강우가 지하수위까지 침투하지 못하며 사면의 경사로 인하여 물이 경사를 따라 하부로 흘러가기 때문인 것으로 판단된다. 낮은 강우강도에 대하여 상부에 비해 하부에서는 약간의 변동을 나타내었는데 이것은 상부에서 침투된 물이 경사를 따라 저류되어 사면 하부에 모이게 되고, 상부의 경우보다 지표면에서 지하수위까지 침투되는 깊이가 얕기 때문인 것으로 판단된다.

나. 함수비 계측

1) 조사목적

강우가 지반으로 침투할 경우 침투심도에 따라 함수비가 변하기 때문에 체적함수비를 모니터링하면 강우에 대한 침투심도 및 침투시간을 알 수 있게 된다. 따라서 강우 침투에 따른 함수비의 변동을 알아보기 위해 함수비를 계측하였다.

2) 계측방법



(a) ECH2O-10 센서



(b) 센서 매설

그림 4.27 ECH2O-10 센서 및 매설

그림 4.24에서 나타낸 바와 같이 사면의 하부에 토심 30, 60, 90, 120cm에 함수비 센서를 매설하여 시간별 함수비를 측정하였다. 체적함수비 센서는 그림 4.27와 같은 Decagon사의 ECH2O-10을 이용하였다. ECH2O-10은 매질의 유전상수를 측정하여 볼트로 표시하며 토양의 유전상수는 함수비와 직접적으로 연관되므로 이를 이용하여 토양의 체적함수비를 측정할 수 있다. 센서의 길이는 약 10cm, 0~50℃에서 운용가능하며 오차는 일반적으로 $\pm 3\%$ 이내이며 보정 시 $\pm 1\%$ 이내이다. 센서에서 측정된 값은 볼트로서 데이터로거와 PC 사이에 통신을 가능하게 해주는 프로그램 상에 자체 내장된 함수를 이용하여 체적함수비로 변환하게 된다. 하지만 이 함수는 토양의 대표적인 값들을 이용하는 것이므로 정확한 계측을 위해서는 각 토양에 따라 보정을 해야 한다. 현장에서 채취한 토양을 이용하여 체적함수비를 변화시키며 센서의 측정값을 기록하여 식 4.10과 같은 보정식을 산출하였다.

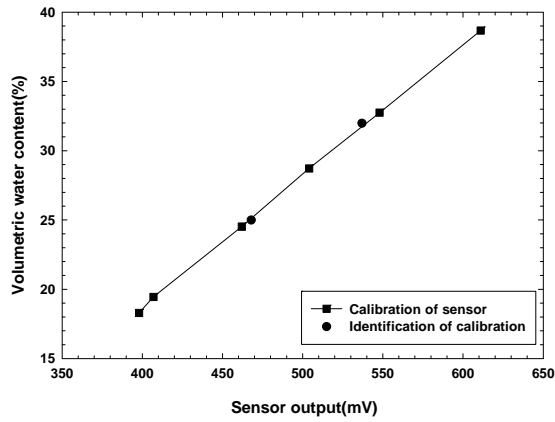


그림 4.25 센서의 보정곡선

$$\theta(\%) = 0.0952 \times \text{Sensor value (mV)} - 19.441 \quad (4.10)$$

$$R^2 = 0.998$$

3) 계측결과

2005년 9월 8일부터 2005년 10월 4일까지의 강우 침투에 의한 함수비 변화를 측정 한 결과는 그림 4.29에 나타난 바와 같으며 강우가 발생하면 사면의 함수비가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 토심별로 함수비를 비교하면 토심 30cm를 제외하고는 토심이 깊을수록 함수비가 크게 나타났으며 강우에 의한 함수비의 변화는 적은 것으로 나타났다. 토심이 낮은 30cm의 경우 강우 침투에 의한 함수비 변화가 가장 크게 나타났다.

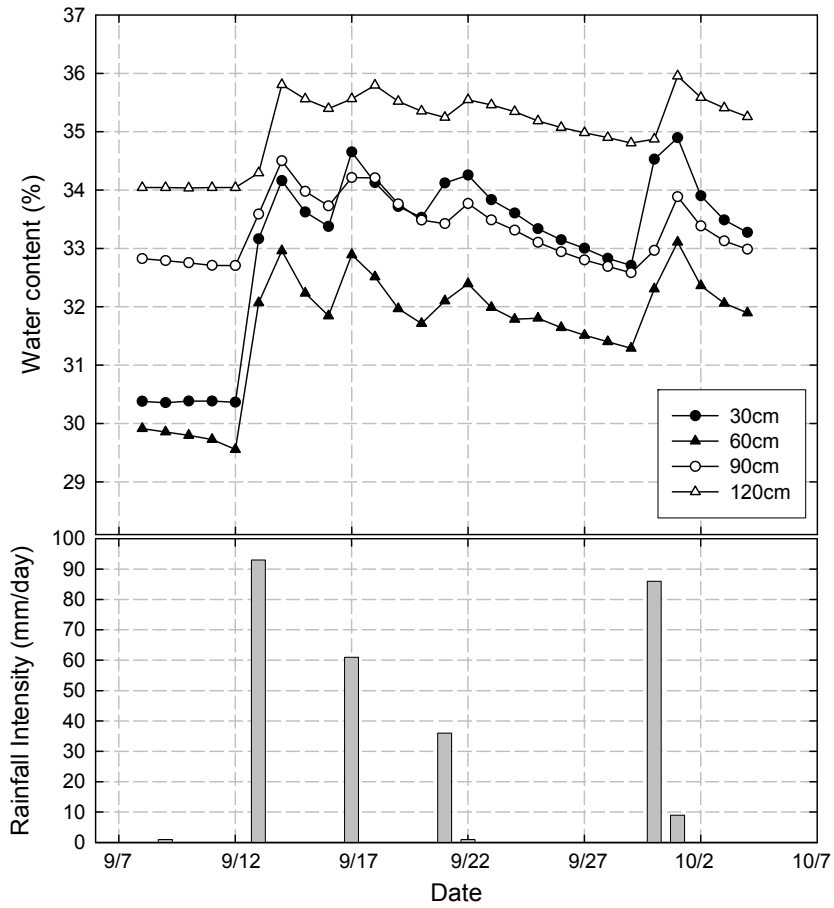


그림 4.29 강우 침투에 의한 함수비 변동

4) 결론

강우에 의한 토심별 함수비 변화를 확인할 수 있었으며 일반적으로 토심이 깊을수록 함수비는 크게 나타났다. 함수비 변화는 토심 30cm에서 가장 크게 나타났는데 이는 지표면으로부터 침투되는 길이가 짧고 공극이 커서 강우에 영향을 가장 많이 받기 때문인 것으로 판단된다.

2. 지형 및 지질분석

가. 물리탐사 및 지반조사

1) 물리탐사

가) 조사목적

전기비저항 탐사는 토양이나 암석의 고유한 전기적 성질, 즉 전기비저항의 변화를 측정하여 지층구조를 규명하는 것으로 시추에 의한 지반조사와 함께 사면의 지층구조를 파악하기 위하여 전기비저항 탐사를 실시하였다.

나) 조사방법

탐사 구간의 연장은 약 60m이며 지반 지질조사 계획을 기초로 하여 전기비저항 탐사의 electrode 간격은 2.5m로 결정하였다. 전극배열은 수직, 수평 탐사를 동시에 수행하는 효과를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있고, 그 결과 2차원 해석이 용이하도록 가단면도를 형성 할 수 있는 웨너-슐럼버저(Wenner-Schlumberger)배열을 이용하였다.

일반적으로 산악지형은 지하수면이 상당히 낮고 산림이 울창한 관계로 전극을 지표면에 꽂을 때 세심한 주의가 필요하다. 또한, 인공적, 자연적 요인으로 통상 지하에 몇 십 mV의 자연전위(self-potential)가 항상 존재하므로 이에 대한 적절한 보정과 함께 측정 시 자연 전위 변화 양상에도 주의를 기울여야 한다. 자연 전위가 측정 점에서 큰 값을 보이는 경우, 인접한 지점을 살펴보고 접지 등 다른 인위적 요인에 의한 것인지 확인하는 작업이 필요하며 무엇보다 잡음을 극복하기 위해서 가능한 많은 전류를 흘려보낼 수 있도록 해야 한다.

본 연구의 전기비저항 탐사 수행을 위하여 사용된 측정 장비는 체코 Geofyzika사의 ResiStar RS-100M 전기비저항 탐사기이다.

다) 조사결과

그림 4.23에 겹보기 비저항 자료를 토대로 구한 2차원 전기비저항 분포도이며 지형효과를 고려하여 도시한 해석단면이다.

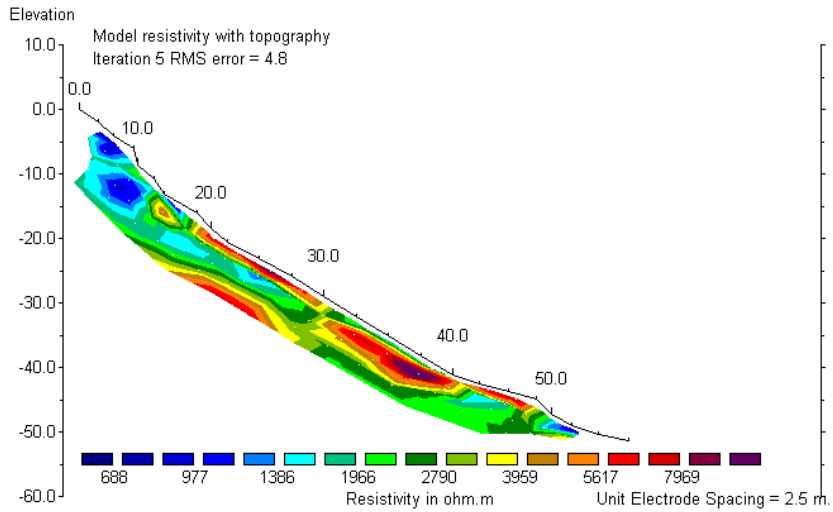


그림 4.30 전기비저항 탐사 해석단면

2) 지반조사

가) 조사목적

시추조사와 표준관입시험을 통하여 사면을 구성하는 지반 및 지질 상태 및 지하수위를 확인하고 지반 공학적 특성을 파악하고자 지반조사를 실시하였다.

나) 조사방법

시추에 의한 지반조사는 지하수위계 매설위치와 동일한 사면중부(B-1)와 사면하부(B-2)에서 시추구경 NX규격으로 행하였다. 표준관입시험은 B-1에서 4회, B-2에서 5회로 총 9회 수행하였다.

표 4.9 지반조사의 항목 및 수량

항 목		수 량
현장 조사	시추조사	2공
	표준관입시험	9회



그림 4.31 시추에 의한 지반조사

다) 조사결과

물리탐사와 지반 시추조사를 통하여 연구 대상지역 자연사면의 지층을 확인하였으며 자세한 내용은 다음과 같다.

시추에 의한 지반조사결과 B-1의 경우 봉적토층은 지표면에서 심도 1m까지 존재하였으며 다음으로 두께 3.3m의 풍화토층, 두께 3m의 풍화암층이 존재하였다. 풍화암층 아래는 연암이 존재하였으며 지표면에서 연암까지의 깊이는 7.3m이다. B-2의 경우 봉적토층은 지표면에서 심도 6.5m까지 가장 두껍게 존재하였으며 다음으로 풍화토층이 두께 0.8m, 풍화암층이 두께 1.7m로 존재하였다. B-1과 마찬가지로 풍화암층 아래는 연암이 존재하였으며 지표면에서 연암까지의 깊이는 9m이다.

표준관입시험을 수행한 결과 B-1에서는 심도 1m 이후로 N치가 높게 나타났으며 B-2의 경우 봉적토층이 두껍게 존재하여 처음에는 N치가 작게 나오다가 심도 4m 이후에는 높은 N치를 나타냈다.

위 치	경기도 양주시	시추번호	B-1
좌 표	X: , Y:	표 고	EL(+) m
시추각도	90(Vertical)	시추구경	NX
지하수위	GL(-) 5.96m	조사일	2005년 8월 16일

심 도	층 후	지반명	현장관찰기록	표준관입시험
1	1.0		붕적토층 * 심도 0.0~1.0m 까지 자갈섞인 실트질 모래 갈색	
2				50/25
3	3.3		풍화토층 * 심도 1.0~4.3m 까지 실트질 모래 갈색	50/28
4				50/4
5	4.3			
6	3.0		풍화암층 * 심도 4.3~7.3m 까지 암편이 박혀 있음	50/3
7				
	7.3			
8	0.7		연암층 * 심도 7.3~8.0m 까지 파쇄와 균열 심함	
9				
	8.0		심도 8.0m에서 굴진 종료	
10				
11				
12				
13				
14				
15				

(a) B-1 지점의 주상도

위 치	경기도 양주시	시추번호	B-2
좌 표	X: _____, Y: _____	표 고	EL(+) m
시추각도	90(Vertical)	시추구경	NX
지하수위	GL(-) 2.46m	조사일	2005년 8월 17일

심 도	층 후	지반명	현장관찰기록	표준관입시험
1	6.5		붕적토층 * 심도 0.0~6.5m 까지 - 심도 0.0~2.4m 까지 잔자갈 섞인 모래 갈색 - 심도 2.4~6.5m 까지 호박돌 및 자갈 섞인 모래 호박돌 $\phi 15\text{cm}$ 이상 자갈 $\phi 3\sim 7\text{cm}$ 갈색	8/30
2				36/30
3				50/15
4				50/26
5				
6				6.5
7	0.8		풍화토층 * 심도 6.5~7.3m 까지 실트질 모래 갈색	50/10
	7.3			
8	1.7		풍화암층 * 심도 7.3~9.0m 까지 암편이 박혀 있음 갈색	
9				9.0
10	2.0		연암층 * 심도 9.0~11.0m 까지 파쇄와 균열 심함	
11				11.0
12			심도 11.0m에서 굴진 종료	
13				
14				
15				

(b) B-2 지점의 주상도
 그림 4.32 시추 지점의 주상도

다) 결론

시추에 의해 지반조사를 수행한 결과 지층은 공통적으로 붕적토층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층으로 이루어져 있었으며 B-1에서는 붕적토층이 1m로 나타난 반면 B-2에서는 6.5m로 나타나 사면하부에 붕적토층이 두껍게 존재하고 있음을 알 수 있었다. 지표면에서 연암까지의 깊이는 B-1이 7.3m이고 B-2가 9m로 나타났다.

표준관입시험을 수행한 결과 B-2에서 평균적으로 N치가 높게 나타났는데 이는 B-2에 비하여 붕적토층이 두껍지 않고 붕적토층 바로 아래 풍화토층이 두껍게 존재하기 때문인 것으로 판단된다.

나. 물성시험

1) 기초 물성시험

가) 조사목적

사면을 구성하고 있는 흙의 기본적인 특성을 파악하기 위해 대상사면의 상부, 중부, 하부에서 각 토심별로 시료를 채취하여 기초 물성시험을 수행하였다.

나) 조사결과

기초 물성시험을 수행한 결과는 표 4.10에 나타난 바와 같다. 사면의 평균 건조단위중량은 약 $15.8kN/m^3$ 이며 평균 비중은 2.63으로 나타났다.

표 4.10 흙의 기초 물성값

Site	토심 (cm)	함수비 (%)	습윤단위중량 (kN/m^3)	건조단위중량 (kN/m^3)	비중	공극비	공극률 (%)
상부	30	16.9	18.51	15.83	2.63	0.661	39.799
	60	17.8	20.08	17.05	2.65	0.555	35.677
중부	30	20.7	18.51	15.33	2.63	0.715	41.695
	60	17.4	19.36	16.49	2.63	0.595	37.308
하부	30	18.2	17.66	14.94	2.63	0.758	43.111
	60	27.6	19.30	15.12	2.62	0.735	42.359
	90	27.9	19.94	15.59	2.64	0.691	40.880
	120	23.4	19.70	15.97	2.63	0.649	39.357

다) 결론

기초물성시험 결과 건조단위중량의 경우 사면의 상부, 중부, 하부 모두 토심이 깊어 질수록 증가하였으며 공극비는 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 흙의 비중은 2.63으로 사면의 위치와 토심별로 거의 비슷하게 나타났다. 흙의 분류는 통일분류법(USCS)상 모두 SC로 분류되었다.

2) Box sampler에 의한 물성시험 및 투수계수 시험

가) 조사목적

지반의 기본적인 물리적 특성과 포화투수계수를 측정하기 위하여 Box sampler를 이용하여 불교란 시료를 채취하였다. 본 연구사면의 경우 잔적토층이 토심 1m를 기준으로 그 이하에서는 풍화된 암석파편들이 나타나므로 1m를 기준으로 2개의 층으로 구분하였으며 토심 50cm와 120cm에서 시료를 채취하여 시험을 수행하였으며 흙의 입도분포를 파악하기 위하여 토심 75cm과 135cm에서 시료를 채취하여 체분석과 비중계를 통한 입도분포시험을 수행하였다.



그림 4.33 Box sampler에 의한 불교란 시료 채취

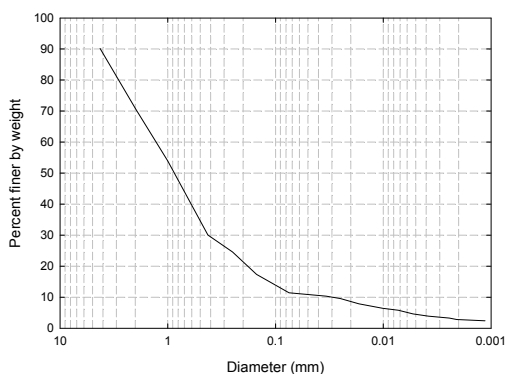
나) 조사결과

Box sampler에 의하여 불교란 시료를 채취하여 물성시험을 수행한 결과 표 4.11과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 건조단위중량은 토심이 120cm인 경우가 토심이 50cm인 경우보다 약 0.75 kN/m^3 크게 나타났으며 비중은 거의 비슷한 값을 나타냈다. 투수계수의 경우 토심 50의 투수계수가 토심 120cm의 투수계수보다 약 5.8배 큰 것으로 나타났다.

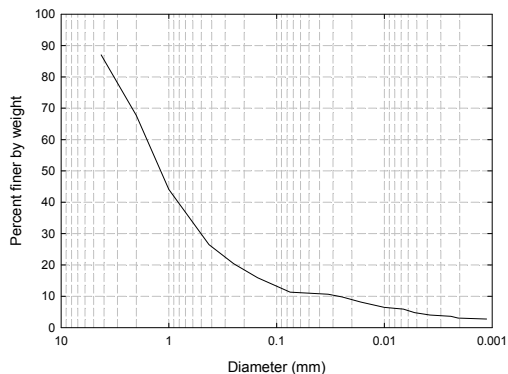
토심에 따라 입도분포곡선을 그려본 결과는 그림 4.34에서 나타난 바와 같으며 거의 비슷한 값을 나타내었다.

표 4.11 흙의 물성값 및 투수계수

Sample No.	토심 (cm)	건조단위중량 (kN/m^3)	비중	공극률 (%)	소성 한계	투수계수 (cm/s)
1	50	15.22	2.629	42.12	15.66	1.92×10^{-4}
2	120	15.97	2.633	39.36	23.07	3.33×10^{-5}



(a) 토심 75cm



(b) 토심 135cm

그림 4.34 사면 하부의 입도분포 곡선

3) 결론

토심이 깊어짐에 따라 건조단위중량은 증가하였으며 공극률은 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 비중의 경우 토심에 따라 큰 차이를 보이지 않고 거의 비슷하였으며, 투수계수의 경우 토심에 따라 큰 차이를 보였는데 이는 두 토심에 대한 입도분포곡선은 거의 비슷하지만 토심이 120cm인 경우가 토심이 50cm인 경우보다 공극률이 작고 건조단위중량이 큰 것으로 보아 상재하중에 의한 다짐의 차이 때문인 것으로 판단된다.

제 5 절 요약 및 결론

본 과제를 수행함에 있어 산사태 발생 지역에 대한 현장조사를 실시하였고 이를 통하여 경기도 양주시 장흥지역을 대상지로 선정하였으며 비교 대상지로 관악산 지역을 선정하였다. 선정된 장흥 지역은 자연사면으로 이는 그 규모가 크기 때문에 실내에서 현장모사가 어려워 실제 거동을 분석하기 위해 계측기를 설치하여 현장 모니터링을 수행함으로써 현장을 모사할 수 있는 자료를 수집하였다.

또한 내적 요인인 지형과 토질, 지질 등을 파악하기 위해 대상지에서 시료를 채취하여 실내 시험을 통하여 기초물성을 파악하였으며, 시험굴 조사와 물리탐사인 비저항 탐사를 실시하여 지반 구조 및 지질을 조사하였다.

그리고 토양 함수비와 지하수위의 지속적인 모니터링이 필요하여 대상지를 새로 선정하고 심도별 함수비와 지하수위의 데이터를 일정한 간격으로 수집하였다. 본 장의 결과는 다음과 같다.

- ① 본 연구 지역의 조사 대상 지역의 지층 분포를 파악하기 위해 시험굴 조사와 물리탐사의 일종인 비저항탐사를 수행한 결과, 경기도 양주시 장흥 지역의 관측 지점에 지하수 유입이 있는 것으로 판단된다. 조사 지역 지반의 비중은 2.60~2.70이며 현장단위중량은 $1.40\sim 1.85\text{ton}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 흙의 분류는 모두 통일분류법으로 SC로 나타났다.
- ② 지하수위를 관측한 결과 강우에 의한 지하수위 상승을 확인할 수 있으며 상부의 경우 침투되지 못한 물이 경사로 흘러가 지하수위의 변동이 없었다. 낮은 강우강도의 경우, 상부에서 침투된 물이 경사를 따라 저류되어 사면 하부에 모이고, 상부의 경우보다 지표면에서 지하수위까지 침투되는 깊이가 짧아 약간의 지하수위 변동이 보인다.
- ③ 시추에 의해 지반조사를 수행한 결과 지층은 공통적으로 붕적토층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층으로 이루어져 있으며 사면하부에 붕적토층이 두껍게 존재하고 있었다. 지표면에서 연암까지의 깊이는 B-1이 7.3m이고 B-2가 9m로 나타났다. 표준관입시험을 수행한 결과 B-2에서 평균적으로 N치가 높게 나타났는데 이는 B-2에 비하여 붕적토층이 두껍지 않고 붕적토층 바로 아래 풍화토층이 두껍게 존재하기 때문인 것으로 판단된다.

- ④ 지반조사지역 기초물성시험 결과 건조단위중량의 경우 사면의 상부, 중부, 하부 모두 토심이 깊어질수록 증가하였으며 공극비는 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 흙의 비중은 2.63으로 사면의 위치와 토심별로 거의 비슷하게 나타났다. 흙의 분류는 통일분류법(USCS)상 모두 SC로 분류되었다.
- ⑤ 지반조사지역의 불교란시료 물성시험결과 토심이 깊어짐에 따라 건조단위중량은 증가하였으며 공극률은 감소하였다. 비중의 경우 토심에 따라 큰 차이를 보이지 않고 거의 비슷하였다. 하지만 상재하중에 의한 다짐 차이로 공극률의 차이가 생겨 투수계수에 큰 차이가 발생하였다.

제 5 장 자연사면 재해 위험성 평가 시스템 개발

제 1 절 서 론

산사태 발생시 많은 재산과 인명피해의 발생하기 때문에 이를 예측하고 피해를 줄이기 위한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다. 산사태 위험성을 정량적으로 표현하는 연구는 산사태가 발생된 지역의 데이터를 기반으로 하는 통계적 방법과 산사태 유발인자들의 기작 연구를 통하여 산사태 발생 가능성을 예측하는 역학적 방법으로 나뉘게 된다. 최근 연구는 통계적 기법의 경우 적용지역의 한계가 있어 지리정보시스템을 기반으로 구성하기 쉽고 일반적인 물리법칙을 이용함으로써 적용지역의 한계성이 적은 역학적 방법이 선호되고 있다.

역학적 기법을 이용한 광역 산사태 위험지 예측 연구에는 보통 무한사면안정해석모형을 사용하고 있는데 이 모형은 지리정보시스템에서 셀단위로 계산이 수행되어 지형 인자중 경사만을 고려하여 안전율을 산정하기 때문에 지형의 굴곡 등을 고려하지 못한다는 단점이 있다. 따라서 지리정보시스템에서 간편하게 굴곡을 고려한 사면안정해석을 할 수 있는 기법을 개발하는 것이 필요하다.

산사태는 지형 외에 지질, 토질, 기후, 식생 등의 많은 요인의 영향을 받는다. 따라서 산사태 위험지 판단에 있어 각 유발 인자들의 영향을 규명 또한 중요하다. 특히 국내 산사태는 여름철 집중 호우로 인한 발생이 빈번하기 때문에 강우에 의한 침투, 유출 등 수문과정과 모관흡수력 저하, 공극수압의 증가 등 수리적 요소의 고려가 필수적이다.

본 장에서는 자연사면 재해 위험성 평가 시스템 개발을 위하여 역학적 기법을 이용한 결정론적 시법의 산사태 예측모델과 이에 이용되는 수리/수문 모형을 연구한다. 자연사면 재해 위험성 평가 시스템의 인자로 사용 될 수 있는 산사태 유발인자의 영향을 규명하고 지형인자를 고려할 수 있는 자연사면 위험성 해석기법을 개발하고자 한다. 또한 기존 자연사면 위험성 평가에 있어 평가 모델의 한계성을 극복할 수 있는 알고리즘을 개발하고 이를 반영한 위험지 평가 시스템을 개발하여 그 효과를 검증한다.

제 2 절 이론 연구

1. 개요

산사태 위험성을 정량적으로 평가하기 위한 연구는 지형 및 지질 인자들과 산사태 상관성을 비교하여 산사태 취약성을 분석하는 통계적 기법과 산사태 유발인자들을 이용하여 산사태 발생가능성을 예측하는 역학적 기법으로 구분된다. 통계적 기법연구는 산사태 발생빈도를 통계적으로 비교하는 방법으로, 산사태의 발생빈도가 결정적인 인자이므로 타 지역에 적용하기 힘들다는 한계가 있다. 역학적 기법은 물리·역학에 기반을 둔 방법으로, 각종 지형, 지질, 토질, 기상 등의 산사태 유발인자들을 수문모형과 사면안정 모형에 적용하여 안전율과 파괴확률을 산정하고 지리정보시스템을 이용하여 광역적인 산사태 위험성을 평가하는 방법이다. 이는 물리적인 법칙에 근거하므로 모든 조건의 사면에 적용가능하다.

산사태는 지형, 지질, 토질, 기후, 식생 등의 많은 요인의 영향을 받는다. 하지만 국내에서 발생하는 산사태는 보통 강우에 의하여 발생하며 이로 인한 침투, 유출 등 수문과정과 모관흡수력 저하, 공극수압의 증가 등 수리적 요인이 산사태의 내적 요인의 영향을 크게 받는다. 따라서 산사태 위험성을 평가하기 위해서는 수리/수문적 요소의 고려가 필수적이다.

본 장에서는 자연사면 재해 평가 시스템 개발을 위하여 물리·역학에 기반을 둔 결정론적 기법의 산사태 예측 모델을 조사하고자 한다. 또한 수리/수문적 요소가 사면안정에 미치는 영향을 평가할 수 있는 모델들을 연구한다.

2. 산사태 예측 모델

가. 개요

산사태 예측 모델은 크게 통계적 기법과 결정론적 기법의 모델로 나눌 수 있다. 그중 결정론적 기법은 물리·역학에 기반을 둔 방법으로, 각종 지형, 지질, 토질, 기상 등의 산사태 유발인자들을 수문모형과 사면안정 모형에 적용하여 안전율과 파괴확률을 산정하고 지리정보시스템을 이용하여 광역적인 산사태 위험성을 평가하는 방법이다. 이 기법은 1980년대 Ward 등(1982), Okimura 등(1985)에 의하여 시작되었다. 이후, Montgomery and Dietrich(1994), Wu and Sidle(1995), Van Westen and Terlien(1996) 등에 의하여 광역적 산사태 위험성 분석방법으로서 정착되었다.

본 장에서는 물리·역학에 기반을 둔 결정론적 기법의 산사태 예측 모델을 조사함으로써, 본 과제의 최종 목표인 역학적 기법에 의한 광역 산사태 평가 시스템 개발의 방향성을 확립하고자 한다.

나. 무한사면 안정해석

대부분의 산사태는 지표와 거의 평행하게 파괴가 일어나며, 사면의 안정성은 경사의 정도, 지층의 구성상태, 지질, 토질, 식생, 지하수 및 기상상황의 영향을 받게 된다. 특히, 무한사면은 활동면의 깊이가 사면의 높이에 비하여 작은 것을 말하며 자연사면 파괴의 대부분은 이와 같은 무한사면 파괴이다.

무한사면의 해석방법은 활동면의 형태를 사면 표면에 평행하게 직선으로 가정한 계산법으로, 흙의 성질과 지하수위 조건은 전체 사면에 걸쳐 변하지 않는 것으로 가정하며, 지표면까지 침투수가 있을 때 가장 위험하다.

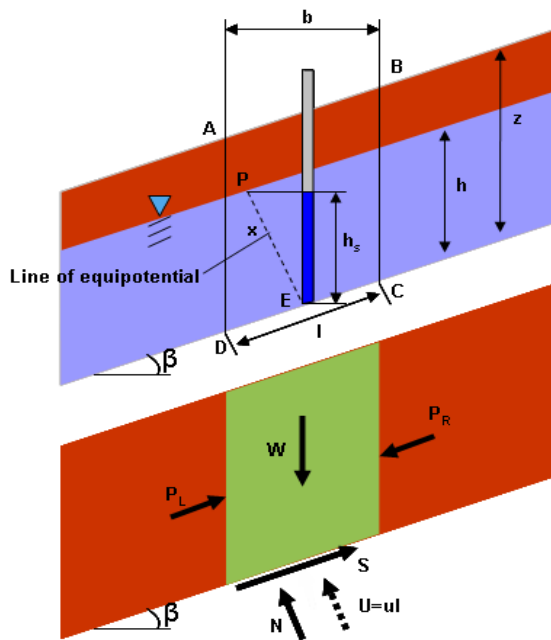


그림 5.1 무한사면 안정해석 개념도

그림 5.1는 Coulomb의 무한사면 안정해석을 나타내며 ABCD 요소에서 토체의 중량과 파괴면 DC의 중앙에 작용하는 공극수압은, 토체의 무게 $W = \gamma z b$ 이므로

$$u = \gamma_w h \cos^2 \beta \quad (5.1)$$

여기서, γ : 흙의 단위중량, γ_w : 물의 단위중량, h : 지하수위, z : 토심,
 β : 사면 경사, u : 공극수압

지하수위는 파괴면과 평행하므로, 지하수위에서 파괴면 중앙까지의 거리 EP는 등수두선이다. E점에서 피에조미터속 물의 높이는 $x = h \cos \beta$ 이므로

$$h_s = h \cos^2 \beta \quad (5.2)$$

여기서, h_s : 피에조미터의 수위
 요소 ABCD에서 공극수압은

$$U = u \frac{b}{\cos \beta} = \gamma_w b h \cos \beta \quad (5.3)$$

활동면에 작용하는 연직성분은

$$N = \gamma b z \cos \beta - \gamma_w b h \cos \beta = b \cos \beta (\gamma z - \gamma_w h) \quad (5.4)$$

활동면에 작용하는 전단강도는

$$S = \frac{c' b}{\cos \beta} + b \cos \beta (\gamma z - \gamma_w h) \tan \phi' \quad (5.5)$$

여기서, c' : 흙의 점착력, ϕ' : 내부마찰각

그러므로 식(5.4), (5.5)로부터 안전율은 식(5.6)과 같다.

$$F = \frac{c' \sec \beta + \cos \beta (\gamma z - \gamma_w h) \tan \phi'}{\gamma z \sin \beta} \quad (5.6)$$

식(5.6)은 식(5.7)로 다시 쓸 수 있으며

$$F = \frac{c' \sec^2 \beta + (\gamma z - \gamma_w h) \tan \phi'}{\gamma z \tan \beta} \quad (5.7)$$

또한 식(5.7)은 식(5.8)과 같이 쓸 수 있다.

$$F = \frac{c' + (\gamma z - \gamma_w h) \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (5.8)$$

Coulomb의 무한사면 안정해석공식에서 $F = 1$ 그리고 $c' = 0$ 이면 내부마찰각(ϕ')은 식(5.8)로부터 식(5.9)와 같이 유도할 수 있다(Cornforth, 2005).

$$\tan \phi' = \frac{\gamma z \tan \beta}{(\gamma z - \gamma_w h)} \quad (5.9)$$

식(5.9)를 h/z 에 대하여 정리하면, 식(5.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{h}{z} = \frac{\gamma}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan \beta}{\tan \phi'} \right) \quad (5.10)$$

습윤지수를 이용한 산사태 해석모형들은 $w_i = h/z$ 로 정의하여 수문모형에서 산정한 습윤지수를 바탕으로 사면안정해석을 수행한다.

그러므로 식(5.10)은 식(5.11), (5.12)와 같이 쓸 수 있다.

$$\tan \beta = [1 - w_i (\gamma_w / \gamma)] \tan \phi' \quad \text{또는,} \quad (5.11)$$

$$w_i = (\gamma/\gamma_w)[1 - (\tan \beta/\tan \phi')] \quad (5.12)$$

TOPOG, SINMAP 그리고 Borga 등(2002)과 같이 습윤지수를 이용하여 산사태 위험지를 예측하는 모델들은 위 식(5.11), (5.12)를 바탕으로 안전율 또는 취약성을 분석한다.

다. 습윤지수를 이용한 무한사면 안정해석

Pack 등(1998)이 제안한 SIPMAP과 Montgomery and Dietrich(1994)가 개발한 모형인 TOPOG는 O'Loughlin(1986)의 지표하흐름(subsurface flow)에 대한 연구를 바탕으로 개발한 습윤지수를 무한사면안정해석에 적용한 모형으로서 SINMAP에서는 투과율계수(Transmissivity)를 토층깊이에 관계없이 동일하다고 가정하였고, TOPOG에서는 지수함수적으로 변한다고 가정하였다.

O'Loughlin(1986)의 정상상태(steady-state condition) 습윤지수와 같이, 지형요소를 바탕으로 구한 지수가 수문학에서 폭 넓게 이용되고 있지만 개발 당시에는 지표의 포화 상태를 예측하기 위하여 개발 되었으며 포화 상태를 예측하는 것은 결국, 지표하의 함수 상태를 예측하는 것과 맥락을 같이 하기 때문에 이후, 많은 지수들이 개발되어 토양의 습윤상태를 파악하는 곳에도 널리 이용되고 있다(Bardossy and Lehmann, 1998; Western 등, 1999). 그림 5.2 i번째 셀에 대한 상부사면의 기여면적을 보여주고 있다.

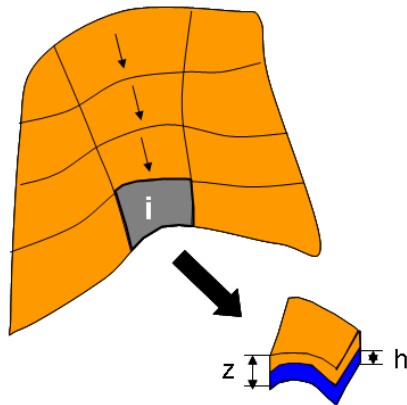


그림 5.2 한 셀에 대한 상부사면의 기여면적

Beven and Wood(1983), Beven 등(1984), 그리고 Sivapalan 등(1987)은 강우가 시작되기 전에, 지하수위는 강우에 의하여 평균적으로 안정된 재충전율이 지배한다고 하였으며, 유역의 임의의 점 i 에서 지표하 유출량 q_i 는 다음과 같이 주어진다.

$$q_i = A_{si}R \quad (5.13)$$

여기서, A_{si} : 단위등고선 폭에 대한 상부사면의 기여면적[L], R : 강우강도[LT⁻¹]

위와 같은 정상상태의 가정에서 O'Loughlin(1986)은 습윤지수를 식(8.27)과 같이 정의 했으며,

$$w_i = A_{si}/\tan\beta \geq 1/q_i \quad (5.14)$$

여기서, w_i : 습윤지수[-], β : 사면의 경사

Montgomery 등(1994)은 기여우량과 임의점의 포화상태에서의 우량의 비로 식(5.15)와 같이 나타내었다.

$$w_i = q_i A_{si} / b_i T \sin\beta \quad (5.15)$$

여기서, T : 투과율계수[L²T⁻¹], b_i : 등고선의 단위 폭[L]

습윤지수 w_i 가 1.0을 초과하게 되면 포화 깊이는 지표까지 이르게 되며, 포화투수계수가 깊이에 따라서 일정하다고 가정하면, 투과율계수 $T = Kz \cos\beta$ 이며 $w_i \leq 1.0$ 인 경우에는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$w_i \leq K \sin\beta h \cos\beta / K \sin\beta z \cos\beta = h/z \quad (5.16)$$

여기서, K : 포화투수계수[LT⁻¹], h : 포화 깊이[L], z : 토심[L]

습윤지수 w_i 는 식(5.15)로부터 구할 수 있고 w_i 는 최대값인 1.0에 도달하면 지표까지 포화되었기 때문에 유출이 발생하게 된다. 식(5.15)를 식(5.12)에 대입하면 단위 등고선 길이에 대한 유출면적의 비인 식(5.17)과 같이 사면의 파괴조건이 된다.

$$A_{si}/b_i = (T/q_i) \sin\beta(\gamma/\gamma_w)[1 - (\tan\beta/\tan\phi')] \quad (5.17)$$

Borga 등(2002)도 강우강도는 침투능을 초과하지 않는다고 가정하고 시간의 흐름에 따라서 상부사면의 기여면적을 구하는 반동역학적 습윤지수(quasi-dynamic wetness index)가 운동파방정식(kinematic wave equation)로부터 유도될 수 있음을 보이고, 반동역학적 기여면적(contributing area)을 바탕으로 무한사면안정해석을 하였다.

Barling 등(1994)이 개발한 반동역학적 습윤지수는 시간에 따라서 상부사면의 기여면적이 변하는 것을 고려하였으며, 일차원적인 흐름을 고려하는 Darcy의 법칙은 다음과 같다.

$$q = -K \frac{dH}{ds} \quad (5.18)$$

여기서, q : 유동밀도[L²T⁻¹], H : 흐름방향에서의 압력수두[L]

지표하흐름을 기술하는 Darcy의 법칙은 공극을 가지는 토양의 특성이 균일하고, 동질성을 가지며, 대수층 내에 모관수대가 존재하고 있다는 가정을 전제로 한다.

만약 지하수면 경사가 지표면 경사와 같다면, 식(5.18)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = K \tan\beta \quad (5.19)$$

여기서, 불투수층의 경사 $\tan\beta$ 는 토양 표면의 경사와 같다고 가정한다.

공극을 고려한 지표하 흐름속도는 다음과 같이 계산한다.

$$v = \frac{q}{\eta} = \frac{K}{\eta} \tan\beta \quad (5.20)$$

여기서, η : 토양 공극률[-]

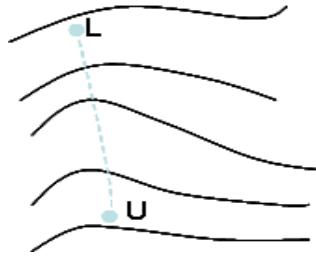


그림 5.3 시간-면적 곡선개념(Iida, 1984)

그림 5.3은 Iida(1984)가 소개한 시간-면적 곡선 개념으로, 이것을 이용하여 임의의 상류지점 L에서 하류지점 U까지 흐르는데 요구되는 시간은 다음과 같이 주어진다.

$$t_{LU} = \int_L^U \frac{dl}{v} = \int_L^U \frac{\eta}{K \tan\beta} dl \quad (5.21)$$

여기서, l : L과 U사이의 흐름선을 따른 거리[L]

만약, 재충전율이 r_o 로 일정하다면, 임의의 점 i 에서 단위폭당 유출량 $q_i(t)$ 와 포화된 지표하흐름의 깊이 $h_i(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_i(t) = r_o A_{ei}(t) \quad (5.22)$$

$$h_i(t) = \frac{q_i(t)}{K \tan\beta} \quad (5.23)$$

여기서, A_{ei} : 시간에 따른 단위 유효 상부사면 기여면적[L], r_o : 재충전율[LT⁻¹]

일반적으로 이 방법을 적용할 때, 각 시간 단계에 따라 한 지점에 기여하는 유출은 도달시간이 동일한 점들을 연결하는 등시간선을 그린 다음, 각 도달 시간에 해당하는 누가면적을 산정함으로써 산출한다.

각 시간 단계에서 단위 등고선 폭 b_i 에 대한 유효 상부사면 기여면적 $A_{ei}(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{ei}(t) = \sum_{i=1}^n A_{ui}/b_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.24)$$

여기서, n : 지표하흐름에 기여하는 상부사면 요소의 수, A_{ui} : i 요소에 기여하는 상부사면의 기여면적[L2]

Borga 등(2002)은 위와 같이 시간에 따른 유효 상부사면 기여면적 $A_{ei}(t)$ 을 구하고, Coulomb의 무한사면안정공식을 이용하여 사면안정해석을 하였으며, 식(5.23)을 식(5.10)에 대입하고, 식(5.23)의 동수경사 $\tan\beta$ 를 $\sin\beta$ 로, 식(5.22)의 재충전율 r 을 강우강도 R 로 사용하여 식(5.25)를 유도하였다.

$$A_{ei} \geq \frac{T}{R(t)} \sin\beta \frac{\gamma}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan\beta}{\tan\phi'} \right) \quad (5.25)$$

식(5.25)은 유효 상부사면의 기여면적 A_{ei} 가 우변보다 같거나 클 때 사면안전을 F 가 1 이하를 표시하게 되고 위험지로 판정하게 된다.

반동역학적 습윤지수는 식(5.22)에서 일정한 재충전율 r_0 를 사용한 반면, 실제 우량을 사용하여 재충전율이 시간에 따라서 변화하는 것을 고려한 것이 동역학적 습윤지수이며, 단위폭 당 유출량 $q_i(t)$ 와 포화된 지표하흐름 $h_i(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_i(t) = \int_0^{t_1} \frac{dA_{ei}(t)}{d\tau} r(t-\tau) d\tau \quad (5.26)$$

식(5.23)에 식(5.26)을 대입하면 식(5.27)과 같다.

$$h_i(t) = \frac{1}{K \tan \beta} \int_0^{t_i} \frac{dA_{ei}(t)}{d\tau} r(t-\tau) d\tau \quad (5.27)$$

여기서, $r(t)$: 시간 단계 t 에서의 재충전율, τ : 적분 변수, t : 흐름에 기여하는 시간

하지만, Grid에서 동역학모델의 재충전율이 일정하지 않고, 임의의 셀에 기여하는 셀의 개수가 다양하다면, 유효 상부사면의 기여면적 A_{ei} 가 동일하더라도 동역학적 모델에서는 임의의 셀에 기여하는 우량이 다를 수 있다. 이것은 임의의 점들에 대한 사면의 경사가 다르고, 지형이 수렴과 발산의 형태를 띠는 것에서 비롯된다. 따라서 본 논문에서는 기여면적이 아니라, 기여우량으로 습윤지수를 구하고자 한다.

이를 구하기 위하여 식(5.26)로 각 셀을 통과하는데 소요되는 시간을 구한다. 각 셀의 크기가 일정한 Grid에서 우량의 개념을 적용하면 기여면적이 아닌 각 셀의 크기만이 유효하기 때문에, 식 (5.26)의 $A_{ei}(t)$ 는 각 셀의 단위 단면적 A_i 로 나타낼 수 있다. 따라서 각 셀에 기여하는 우량은 식(5.28), 포화깊이는 식(5.29)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_i(t) = \int_0^t \frac{dA_i}{d\tau} r(t-\tau) d\tau \quad (5.28)$$

$$h_i(t) = \frac{1}{K \tan \beta} \int_0^t \frac{dA_i}{d\tau} r(t-\tau) d\tau \quad (5.29)$$

라. 결정론적 기법의 산사태 예측 모델

Montgomery and Dietrich(1994)는 정상상태 강우조건에서 포화도를 예측하는 TOPOG 모형과 무한사면안정해석모형을 이용하여 상대적 위험성을 제시하였다. Pack 등(1998)은 얇은 산사태의 위험성을 예측하는 SINMAP(Stability INdex MAPing) 모형을 제시하였는데, 1차원의 사면모형과, 2차원의 수문모형을 결합하였으며, 안전율과 함께 안정성지수(SI, Stability Index)를 제시하여 사면의 안정성을 6가지 그룹으로 나타내었다.

그 후 미국에서는 SHALSTAB, LISA, SOILS, SMORPH, 그리고 Inversion 모형 등

많은 모형들이 개발되었다. 이 모형들은 모두 지하수위를 추정하는 모형과, 무한사면모형의 결합으로 구성되어 있다.

Van Westen and Terlien(1996)은 토심이 비교적 깊은 네덜란드 산지지역에 대하여 역학적 기법을 적용하여 위험성을 나타내었다. 2차원의 수문모형을 적용하여 지표면의 포화 및 지하수위 상승을 모의하였고, 3차원적 해석의 필요성을 제기하였다. 수문모형을 적용함에 있어서, Montgomery and Dietrich(1994) 등은 정상상태의 흐름을 고려하였고, 그 후 유사정적, 유사동적(Borga, 2002) 모형들이 개발되었다.

Gritzner 등(2001)은 지형속성 및 DYNWET 모형에 의하여 생성되는 습윤지수(wetness index)에 근거하여 Idaho, Payette의 Middle Fork의 $875km^2$ 의 유역에서 559개 산사태의 위치를 통계적으로 예측하고자 하였다.

사면안정해석기법과 수문모형을 결합한 산사태 위험성 평가 연구에 대해 국내에서는 아직, 지반공학자들에 의한 접근이 많지 않은 실정이다.

김홍택 등(2001)은 제주도 지역에 대하여 GIS 기법을 이용한 토석류의 발생 위험성을 평가였고, 김홍택 등(2002)은 충남 보은 지역에 대하여 동일한 방법을 적용하였다. 그런데, 적용지역의 범위가 역학적 기법을 적용하기에는 너무 큰 범위를 다루고 있어서, 실효성이 떨어지는 문제가 있다.

지광훈 등(2002)은 결정론적 모형과 통계적 모형의 비교를 시도하였고, 통계적 모형의 경우 산사태자료가 없는 곳에 대한 예측의 정확성이 떨어진다고 보고하였다. 이연희 등(2003)도 결정론적 모형과 통계적 모형을 비교하였으며, 이때 습윤지수를 0에서 1로 변화시키면서 산사태발생 빈도와 비교하였는데, 습윤지수가 1이 될수록 산사태 발생빈도와 잘 일치한다고 하였다.

지금까지 시도된 연구들은 외국의 연구들을 그대로 따르고 있으며, 산지의 지형, 지질, 수문, 지반 등의 유발인자들의 변화에 대한 고려가 미흡하고, 적용 범위에 대한 언급이 없는 실정이다.

1) TOPOG

수문 모델인 TOPOG는 정상상태 강우에 의한 토양 포화의 정도를 예측하는 모델이다. 사면 안정성의 구성요소는 이러한 상대적인 토양 포화도를 사용하여 각 지형적 요소들의 안정성을 평가한다. 정상상태 강우는 얇은 산사태의 상대적인 잠재 정도를 측정할 수 있는데, 그것을 통하여 각 지형적 요소들이 가져오는 불안정성을 예측한 지형적 속성을 3차원으로 표현한다.

가) 특징

TOPOG는 지형적 속성을 3차원으로 표현하는 모델이고, 정상상태 수문 검층, 침식으로 인한 위험성 그리고 산사태 위험 지수들의 공간 분포를 예측하는 특성을 가진다. 또한 유역에서의 수문학적 거동을 모델링하고, 그것이 유역 식생의 변화에 어떠한 영향을 받는지 알아낸다. 그로인해 식생의 성장과 그것이 수문평형에 미치는 영향을 모델링하고, 토양을 통한 용질의 이동과 지표면을 통한 퇴적물의 이동을 모델링 할 수 있다.

나) 프로그램 및 입출력 구성

TOPOG는 Fortran과 C 프로그램 언어로 만들어졌고, 전체 패키지는 UNIX 워크스테이션 기반에서 기동된다.

TOPOG는 크게 ‘Steady State Water Balance Modeling’과 ‘Dynamic Water Balance modeling’으로 구성되어 있다. 그 중 산사태 지수를 구하는 프로그램은 ‘Steady State Water Balance Modeling’에 속한다. ‘Steady State Water Balance Modeling’를 수행하는 프로그램을 ‘TOPOG_Simul’이라 하는데 이는 표 5.1과 같이 구성되어 있다.

표 5.1 ‘TOPOG_Simul’의 구성과 각각의 차원

구분	차원
Steady-state drainage index	-
radiation weighted drainage index	-
Uniform Excess Stream Power	m^2/s
Variable Excess Stream Power	m^2/s
Erosion Hazard Index	m^2/s
Saturation Flow shear stress	$dynes/cm^2$
Hortonian shear stress	$dynes/cm^2$
Landslide index (Critical rainfall)	mm/day

(1) 산사태 위험성 지수

R_{cr} 은 산사태를 일으키기 위한 최소 정상상태 강우를 말한다(Montgomery and Dietrich, 1994). R_{cr} 은 다음과 같이 정의된다.

$$R_{cr} = T \sin \theta \frac{\rho_s}{\rho_w} \left[\frac{a}{b} \right]^{-1} \left[1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right] \quad (5.30)$$

위의 식에 의한 계산 결과 값은 .lhi 파일 형태로 저장된다.

(2) 공간 데이터의 디스플레이

TOPOG를 통한 공간 데이터들은 ‘TOPOG_Display’라는 프로그램에 의하여 표현될 수 있다. 그 구성은 다음과 같다.

- xy data points
- contours, streamlines, roads, fences and polygons
- terrain attributes such as slope, aspect or potential solar radiation
- steady-state wetness, stream power and erosion hazard indices
- transpiration rate, water table depth and soil moisture content
- groundwater recharge and depth to aquifer

2) SINMAP(Stability INDEX MAPing)

SINMAP은 R.T. Pack 등에 의해 1998년 개발된, 수치지도 형식의 지리학적 정보에 기반을 두고 사면안정성 지수를 계산하는 Arcview extension이다. SINMAP 모델의 한계평형해석식에서는 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용하며, 파괴면은 사면의 지표면에 평행하고 풍화암과 표토층 사이에서 발생한다는 가정하에 무한사면에서의 안정해석식을 사용하여 위험도를 분석한다(Hammond et al., 1992).

가) 배경이론 및 특징

먼저, 한계평형식을 식으로 표현하면 식(5.31)과 같으며, 각각의 입력항에 들어가는 변수들에 대해서는 그림 5.4에 도시되어 있다. 식(5.31)에서 식물의 뿌리에 의해 파괴면에서 발생할 수 있는 전단저항을 뿌리점착력(C_r , N/m^2)이라고 정의할 수 있으며, 표토

층과 풍화암 사이의 포화시의 점착력과 내부마찰각을 각각 $C_s(N/m^2)$ 및 $\phi(^{\circ})$ 로 표현할 수 있다. 또한, 지표면의 경사는 파괴면과 평행하다는 가정으로 파괴면 및 지표면의 경사 각도는 $\theta(^{\circ})$ 라고 정의할 수 있으며, 포토층의 두께 및 포화된 포토층의 두께를 $D(m)$ 및 $D_w(m)$ 라고 정의한다. 흙의 포화단위중량을 γ_s 라고 표현할 수 있으며, 물의 단위중량은 γ_w 로 나타낼 수 있다.

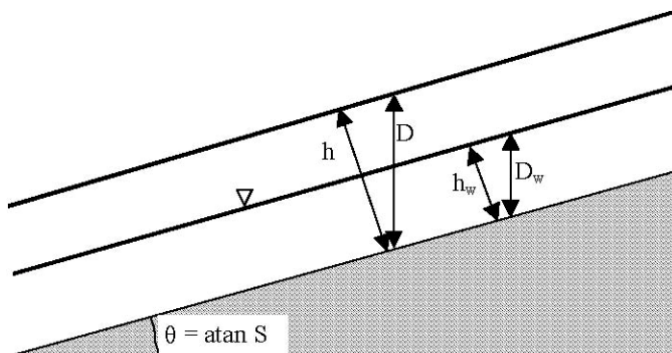


그림 5.4 한계평형식의 입력항사이의 관계

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2\theta[\gamma_s(D - D_w) + (\gamma_s - \gamma_w)D_w]\tan\phi}{\sin\theta\cos\theta(\gamma_s D)} \quad (5.31)$$

SINMAP 모델에서 지하수의 연직방향 두께를 예측하기 위하여 포화 흐름에 대해 알은 연직방향 지하수의 흐름은 사면의 경사와 평행하다는 무한사면에서의 지하수 흐름으로 가정하였으며, 측방으로 유출되는 배수량은 측방에서 유입되는 침투량과 같다는 정상류 상태의 가정 하에, Darcy의 법칙을 적용하여 포화층의 두께(D_w)를 산정하였다. 여기서

$$h = D\cos\theta \quad (5.32)$$

와 같이 표현함에 따라 FS 의 식이 다음과 같이 간략해 진다.

$$FS = \frac{C + \cos\theta[1 - wr]\tan\phi}{\sin\theta} \quad (5.33)$$

여기서

$$w = D_w/D = h_w/h \quad (5.34)$$

이고, 이것은 상대 습윤도를 나타낸다. 점착력은

$$C = (C_r + C_s)/(h\gamma_s) \quad (5.35)$$

로 결합될 수 있고, 물과 흙의 밀도비에 의해 상대적인 무차원 값인

$$r = \rho_w/\rho_s \quad (5.36)$$

를 만들어 낼 수 있다.

얇은 측방 지하수의 흐름은 사면의 경사를 따른다고 하는 가정은 어느 점에서의 흐름 기여면적(Contributing Area)이 비집수량(Specific Catchment) $a(m^2)$ 로 표현될 수 있음을 의미한다. 비집수량 면적은 단위 등수두선의 길이에 대한 그리드셀에 들어오는 면적으로 정의할 수 있는데, 이 매개변수는 Beven & Kirkby(1979)에 의해 발견됐으며, 이는 근래 수문학의 기록할만한 발전 중 하나였다. 그것은 포화에 의한 유출의 발생을 표현하는 근래의 수문학 모델들과 밀접한 관계를 맺고 있다(TOPMODEL Beven & Kirkby, 1979; O'Loughlin, 1986; TOPOG Moore et al., 1988; Moore & Grayson, 1991; THALES Grayson et al., 1992a; Grayson et al., 1992b). 이러한 발전은 수렴하는 경향이 있는 높은 토양 수분 또는 정상포화 지역에 대한 현장조사의 결과로서, 수렴 현상의 지역에서 시작하는 가장 일반적인 산사태의 조사에 사용되어왔다(Montgomery & Dietrich, 1994). 정상 포화 흐름에 있어서, 측방으로 유출되는 지하수의 유량은 투수량계수(Soil transmissivity) $T (m^2/hr)$ 를 이용하여 표현될 수 있다(Pack et al., 1999).

TOPMODEL에 대하여 다음과 같은 가정이 있다.

- ① 얇은 측방 지표하 흐름은 지형 경사도를 따른다. 이것은 어떤 점에서 흐름의 기여 면적이 표면 지형으로부터 정의된 비집수량에 의해 주어짐을 의미한다.
- ② 각 점에서의 측방 유출은 정상상태 강우강도 $R (m/hr)$ 과 평형을 이룬다.

- ③ 각 점에서의 측방 유출량은 $T\sin\theta$ 이다. 여기서 T 는 투수량계수 (m^2/hr)로서 투수계수 (m/hr)에 흙의 두께 h (m)를 곱한 값이다.

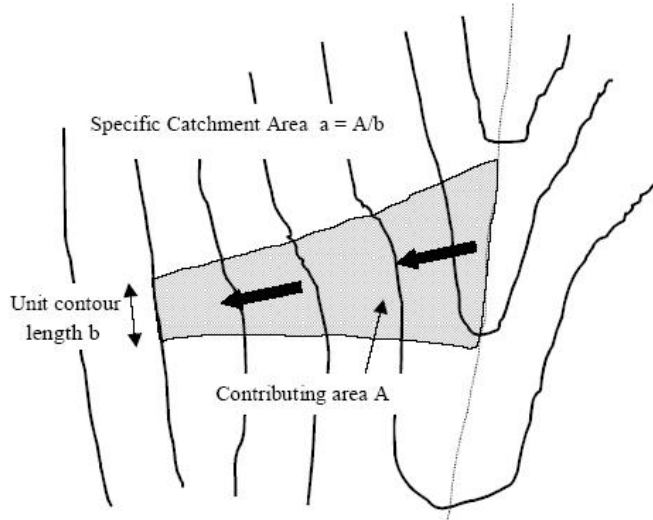


그림 5.5 비집수량의 정의

$$q = TL \frac{\Delta H}{L} \quad (5.37)$$

$$T\sin\theta b = K_s D \cos\theta \sin\theta b \quad (5.38)$$

T 는 깊이에 상관없이 일정하며, b 는 흐름 길이, K_s 는 포화투수계수를 의미한다. 지하수의 측방 유량은 침투량과 기여면적의 곱으로 표현될 수 있다.

$$Ra = K_s D_w \cos\theta \sin\theta b \quad (5.39)$$

D 는 흙의 연직방향 두께이다. 식 (5.38)과 (5.39)를 조합하면 지하수의 두께는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$D_w = D \frac{R}{T} \frac{a}{b \sin\theta} \quad (5.40)$$

위의 TOPMODEL에 대한 가정 중 세 번째 항목은 투수계수가 감소한다고 가정하지 않은 점에서 일반적인 TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979)의 가정과 다르다. 대신에 상대적으로 지나치게 불투수성인 기반암의 균등한 투수계수를 가정한다. 또한 여기서 $\tan\theta$ 보다는 $\sin\theta$ 를 사용하는데, 그 이유는 흐름의 연장이 사실상 경사를 따르므로 이것이 더욱 정확하기 때문이다. 하지만 $\tan\theta$ 와 $\sin\theta$ 의 차이는 산사태를 일으키는 가파른 경사가 아닌 작은 각에서는 무의미하다. 가정 중 세 번째 항목에서의 상대 습윤도는 다음과 같다.

$$w = \text{Min}\left(\frac{Ra}{T\sin\theta}, 1\right) \quad (5.41)$$

상대 습윤도는 토양층 안에 검사된 수위의 상대적 깊이로 정의되는데, 지표 유출 형태의 어떠한 초과 가정에 의해도 상대 습윤도는 1보다 큰 값을 가지지 않는다. 식 (5.41)의 상대 습윤도를 식 (5.33)과 결합하면 FS 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$FS = \frac{C + \cos\theta [1 - \min(\frac{R}{T} \frac{a}{\sin\theta}, 1)r] \tan\phi}{\sin\theta} \quad (5.42)$$

여기서 C , $\tan\phi$, r , R/T 값은 입력 값인 데에 반해, 변수 a 와 θ 는 DEM 지형도로 부터 얻어질 수 있다. 밀도비 r 은 상수인 것처럼 취급되지만, 나머지 세 개의 입력 값은 불확실성을 허락하여 다음과 같은 균등 확률 분포로 표현할 수 있다.

$$R/T = x \quad (5.43)$$

$$\tan\phi = t \quad (5.44)$$

$$C \sim U(C_1, C_2) \quad x \sim U(x_1, x_2) \quad t \sim U(t_1, t_2) \quad (5.45)$$

C 와 t 값 중에서 가장 작은 값, 즉 C_1 , t_1 은 x 값 중 가장 큰 값, 즉 x_2 와 함께 불확실성을 추정하는 시나리오 중 가장 보수적인 경우로 정의된다.

정리하면, SINMAP은 지형적 경사 및 특정 집수면적에 대한 입력 값, 전단강도와 같은 재료의 특성을 정량화하는 매개변수 및 습윤지수 같은 기후인자로부터 지형 안정성 분류를 도출해 낸다. 이들 매개변수 각각은 대상지역의 수치 그리드위에 묘사된다. 이

모델링 접근법의 결과는 안정성 지수로 나타나는데, 그 수치 값은 연구지역 내의 각 그리드 위치에서 지역 안정성을 분류하는데 이용된다. 지형적 변수들은 수치지도의 데이터로부터 자동적으로 계산된다. 안정성 지수는 불확실한 범위의 매개 변수들을 균일한 분포로 가정하여 안정한 위치에서의 확률로 정의되는데, 그 값은 0(가장 불안정)과 1(가장 안정) 사이의 범위다.

표 5.2 SINMAP의 안정성 지수에 따른 등급분류

조건	계급	예측상태	변수 범위	모델에서 정의되지 않은 가능한 영향인자
$SI > 1.5$	1	Stable slope zone	Range cannot model instability	Significant destabilizing factors are required for instability
$1.5 > SI > 1.25$	2	Moderately stable zone	Range cannot model instability	Moderate destabilizing factors are required for instability
$1.25 > SI > 1.0$	3	Quasi-stable slope zone	Range cannot model instability	Minor destabilizing factors could lead to instability
$1.0 > SI > 0.5$	4	Lower threshold slope zone	Pessimistic half of range required for instability	Destabilizing factors are not required for instability
$0.5 > SI > 0.0$	5	Upper threshold slope zone	Optimistic half of range required for instability	Stabilizing factors may be responsible for stability
$0.0 > SI$	6	Defended slope zone	Range cannot model stability	Stabilizing factors are required for stability

나) 프로그램 및 입출력 구성

SINMAP은 수치지도 형식의 지리학적 정보에 기반을 두고 사면안정성 지수를 계산하고 지도화하는 프로그램으로, 윈도우 기반의 Arcview(ESRI) extension이다. SINMAP은 'C++' 프로그램 언어 기반으로 이루어졌으며, 기존의 TOPOG 모델과 같은 등고선 기반의 GIS 모델이 아닌 격자 기반의 디지털 지형 모델이다.

사면의 산사태에 대한 안전율을 계산하기 위해서는 수치지도와 함께 토질정수 등의 입력 값이 필요한데 이는 표 5.3과 같다.

표 5.3 SINMAP에서의 토질정수 입력값과 기본값

입력 값	기본 값
중력가속도 (m/s^2)	9.81
흙의 단위중량(kg/m^3)	2000
물의 단위중량(kg/m^3)	1000
S-A 그래프 상의 점의 수 (-)	2000
T/R (하한 값) (-)	2000
T/R (상한 값) (-)	3000
점착력($C = (C_r + C_s)/(h\gamma_s)$) (상한 값) (-)	0
점착력($C = (C_r + C_s)/(h\gamma_s)$) (하한 값) (-)	0.25
내부마찰각 (상한 값) ($^\circ$)	30
내부마찰각 (하한 값) ($^\circ$)	45
S-A 그래프 상의 습윤지수 하한선 (%)	10

수치지도와 위의 입력값들을 통하여 계산된 결과는 다음과 같은 형태로 표현된다.



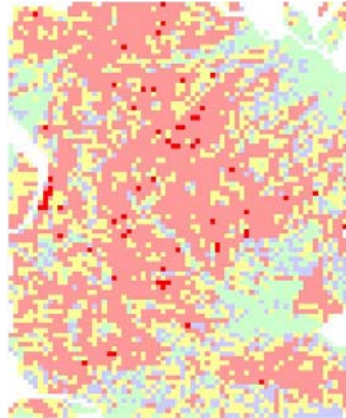
(a) 흐름 방향



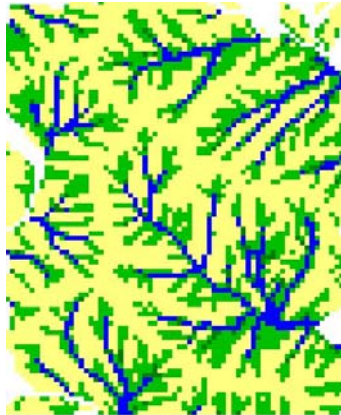
(b) 사면향 지도



(c) 지배면적 지도



(d) 안전율 지도



(e) 포화도 지도

그림 5.6 SINMAP 모델 결과

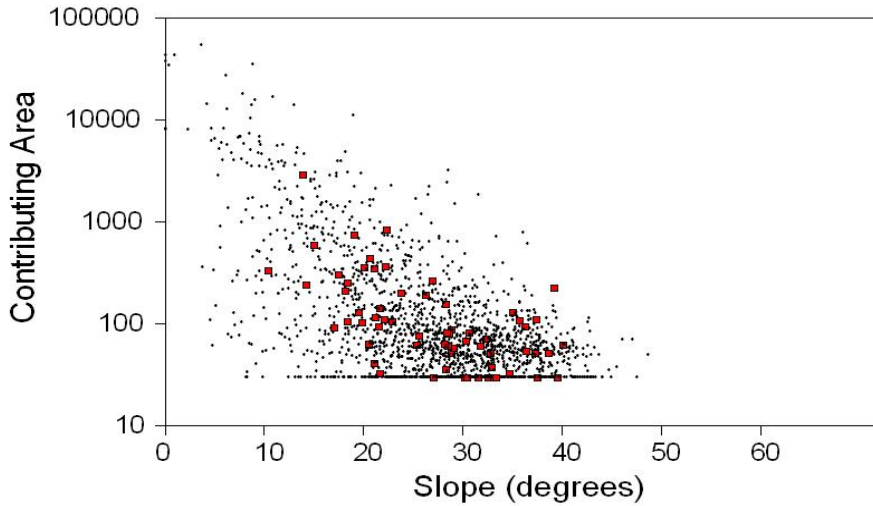


그림 5.7 경사도-분포지 그래프

3) SHALSTAB

SHALSTAB은 1994년 William E.Dietrich와 David R.Montgomery에 의해 개발된 디지털 지형 모델로서, 사면 불안정성 잠재도의 패턴을 지도화 하는 모델이다.

가) 배경이론

SHALSTAB의 이론적 배경은 무한사면 안정이론과 수문모델이론으로 나누어지며 최종적으로 두 이론을 결합함으로써 모델이 완성된다.

(1) 무한사면 안정성 이론

SHALSTAB은 Mohr-Coulomb 파괴이론에 의한 무한 사면 공식에 기반을 둔다.

$$\tau = C + (\sigma - u)\tan\phi \quad (5.46)$$

위 식에서 C 는 토양점착력과 뿌리점착력을 나타낸다. 여기서 토양점착력은 넓은 범위의 값의 분포를 이루어 그 패턴을 매개변수화 하기 힘들뿐더러, 그 값이 매우 보수적인 결과를 가져온다. 그렇기 때문에 SHALSTAB에서는 점착력의 항을 삭제하고 다음 식을 유도하였다.

$$\rho_s g z \cos \theta \sin \theta = (\rho_s g z \cos^2 \theta - \rho_w g h \cos^2 \theta) \tan \phi \quad (5.47)$$

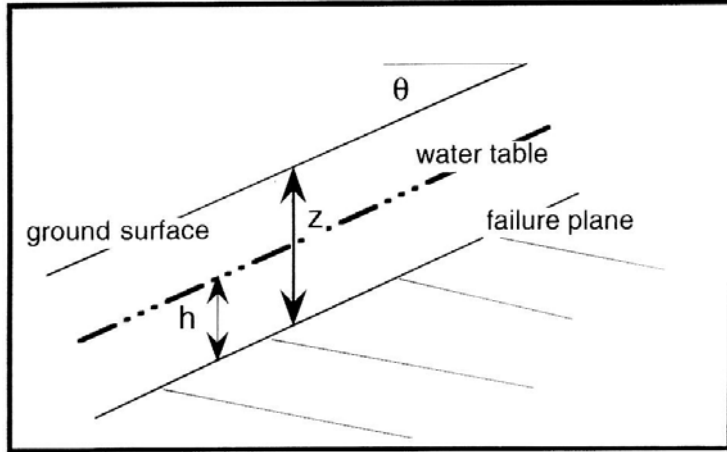


그림 5.8 무한사면 안정성 공식의 기본 개념

여기서, z 는 토심을, h 는 파괴면으로부터의 지하수위를 말한다. 위의 식을 h/z 에 대한 식으로 정리하면, 토심에 대한 포화된 깊이로 불안정성을 생각해볼 수 있다.

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \quad (5.48)$$

(2) 수문모델

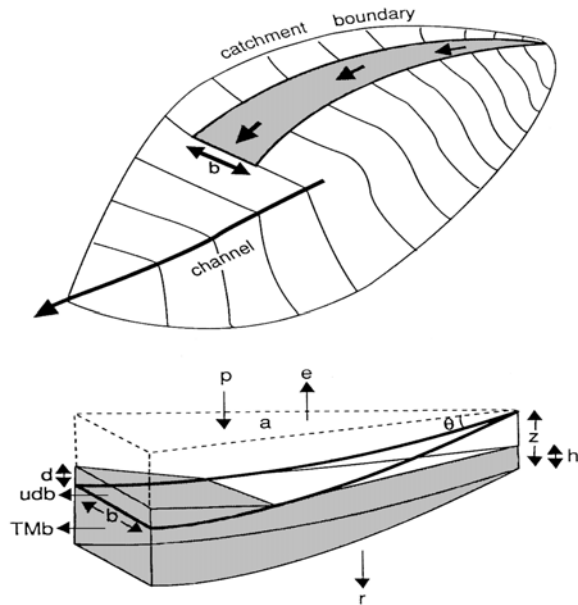


그림 5.9 수문모델의 기본개념

지표유출과 기반암에서의 흐름이 없다고 가정하면, Darcy의 법칙은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$qa = k_s h \cos \theta \sin \theta b \quad (5.49)$$

$$Tb \sin \theta = k_s z \cos \theta \sin \theta b \quad (5.50)$$

여기서, q : 유효강우량도

a : 배수면적

T : 토양 전도

위의 두 식을 결합하면 다음과 같다.

$$\frac{h}{z} = \frac{q}{T} \frac{a}{b \sin \theta} \quad (5.51)$$

(3) 무한사면 안정성 이론과 수문모델의 결합

앞에서 유도된 무한사면안정 공식과 수문공식을 결합하면 다음과 같다.

$$\frac{q}{T} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \frac{b}{a} \sin \theta \quad (5.52)$$

SHALSTAB에서는 위의 식을 이용하여 안정성의 등급을 ‘절대 안정, 포화’, ‘절대안정, 불포화’, ‘불안정, 포화’, ‘불안정, 불포화’, ‘안정, 불포화’, ‘절대 불안정, 포화’, ‘절대 불안정, 불포화’로 나눈다.

나) 특징

이 모델은 기존의 유사한 모델들에 비하여 사면 불안정성 계산을 위한 많은 과정과 인자들을 생략했다. 그러한 이유로 이 모델은 정상상태의 유출 상태만을 고려하였고, 강우 사상의 동적 모델링은 고려되지 않았다. 또한 이 모델은 SINMAP과 비교하여, 식생의 뿌리 강도가 사면의 불안정성에 미치는 영향을 고려하지 않았다.

다) 프로그램 및 입출력 구성

SHALSTAB은 ‘C++’ 프로그램 언어로 만들어진 ARC/INFO(ESRI) Extension이다.

SHALSTAB은 식(5.19)의 h/z 와 사면각에 따라 사면 안전성의 등급을 다음과 같이 분류하였다.

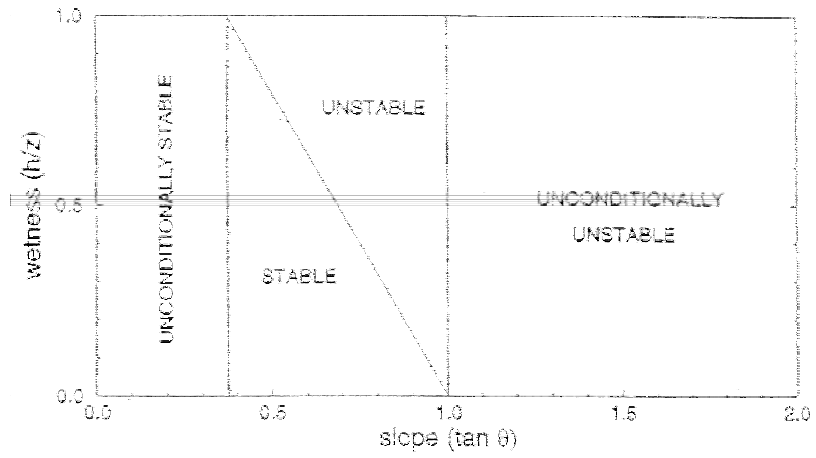


그림 5.10 습윤지수-사면경사에 따른 안전성 등급

그림 5.10에 의하여 분류된 사면 안정성 등급은 다음과 같이 표현 된다.

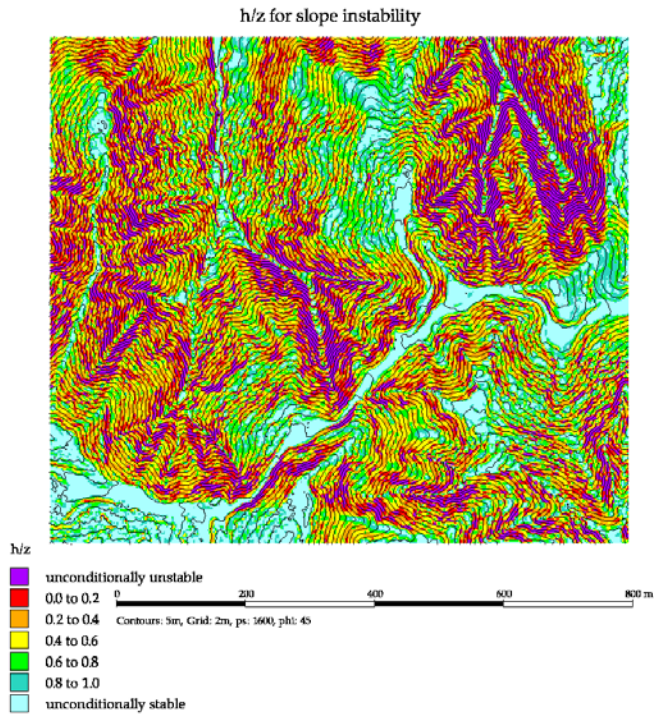
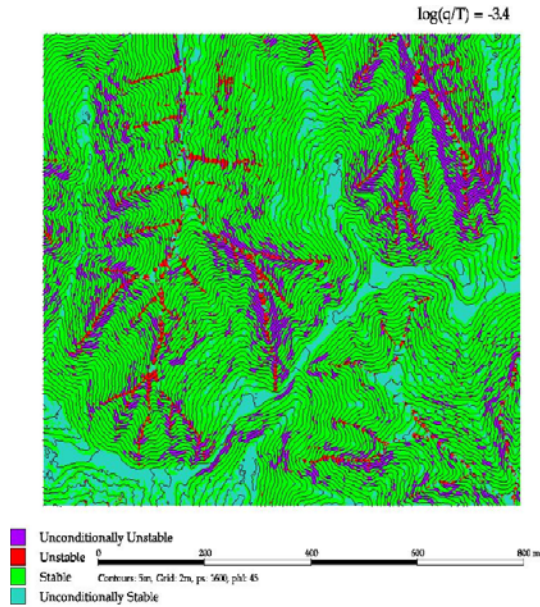
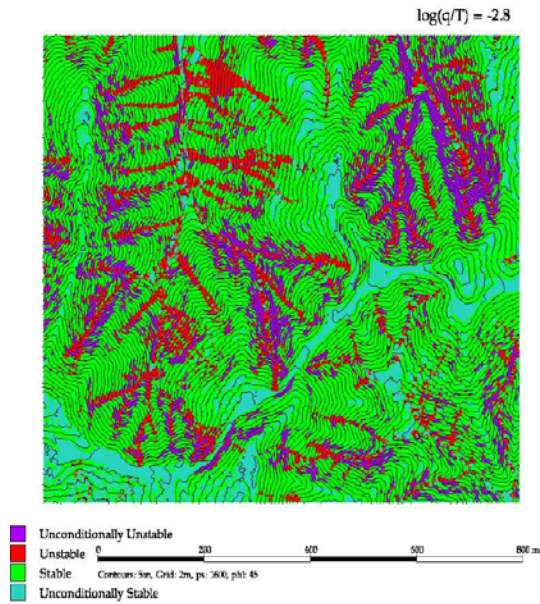


그림 5.11 h/z에 따른 사면 안정성 등급 분류 표현

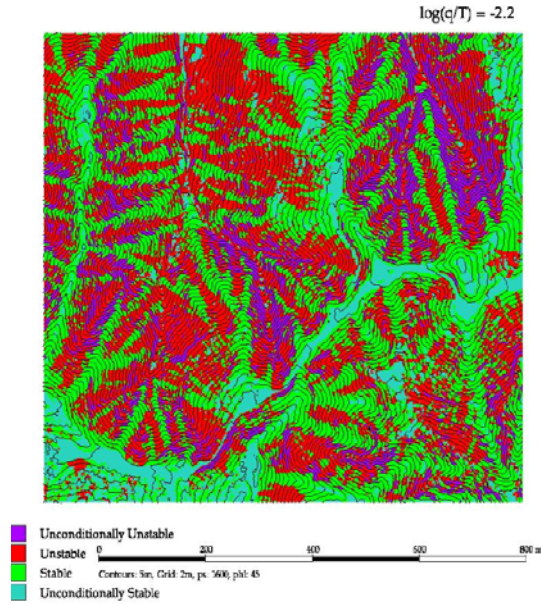
또한 SHALSTAB은 무한사면 안정성 이론과 수문모형을 결합하여 얻어낸 식(5.23)의 q/T 값에 \log 를 취하여, 그 값의 변화에 따른 사면 안정성 등급을 다음과 같이 표현한다.



(a) $\log(q/T) = -3.4$



(b) $\log(q/T) = -2.8$



(c) $\log(q/T) = -2.2$

그림 5.12 $\log(q/T)$ 에 따른 사면 안전율 등급의 변화

4) LISA

LISA(Level Stability Analysis)는 미국 농무성 산림청에서 개발된 모델로 지형학적 그리고 지질학적으로 유사한 지역에 대하여 사면의 위험평가를 위한 도구이다.

가) 배경이론 및 특징

LISA는 사면파괴의 가능성을 평가하기 위하여 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하며 안전율에 기반을 둔 확률론적인 분석의 실행은 다음 식에 의하여 계산된다.

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2 \alpha [q_0 + \gamma_m D_m + (\gamma_{sat} - \gamma_w) D_W] \tan \phi}{\sin \alpha \cos \alpha [q_0 + \gamma_m D_m + \gamma_{sat} D_W]} \quad (5.534)$$

여기서, C_r = 뿌리의 강도, C_s = 흙의 점착력, q_0 = 식생의 하중,

D_m = 습윤대의 수직두께, D_W = 침윤층의 두께, γ_m = 습윤단위중량

γ_{sat} = 포화단위중량, γ_w = 물의 단위중량, α = 경사각, ϕ = 마찰각

식에서 각 매개변수에 대한 가치는 확률분포함수에 의하여 정의된다. 결과는 Monte Carlo 시뮬레이션을 사용하여 1000개까지의 다른 매개변수의 조합에 대하여 계산된 안전율의 분포를 막대그래프에서 보여준다. 또한 파괴의 가능성은 다른 매개변수의 조합으로부터 계산된다.

LISA는 분포된 자료의 사용을 허락하기 때문에 SINMAP보다 사면의 안정성 평가에 더 우선적이다. LISA로부터 얻은 결과는 위험지도를 그리는데 이용될 수 있다. 그러나 이것은 현재 모델에 포함된 기능이 아니다.

나) 프로그램 및 입출력 구성

LISA의 매개변수 입력형식은 다음 표 5.4와 같다.

표 5.4 LISA의 매개변수 입력 형식

구분	분포형태	입력형식
토심 (ft)	등분포	최소값, 최대값
사면각 (%)	히스토그램	9개 등급
식생의 하중 (psf)	등분포	최소값, 최대값
뿌리 점착력 (psf)	베타	최소값, 최대값, P, Q
마찰각 (°)	정규분포	평균, 표준편차
토양 점착력 (psf)	등분포	최소값, 최대값
건조단위중량 (pcf)	정규분포	평균, 표준편차
함수율 (%)	정규분포	평균, 표준편차
단위중량	-	-

표 5.4와 같이 LISA는 최대값과 최소값 또는 평균값과 표준편차 등의 형식으로 입력 매개변수들을 받아들여 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행한다.

표 5.4의 입력 매개변수에 따른 사면 안전율의 산출은 다음과 같은 형식으로 표현된다.

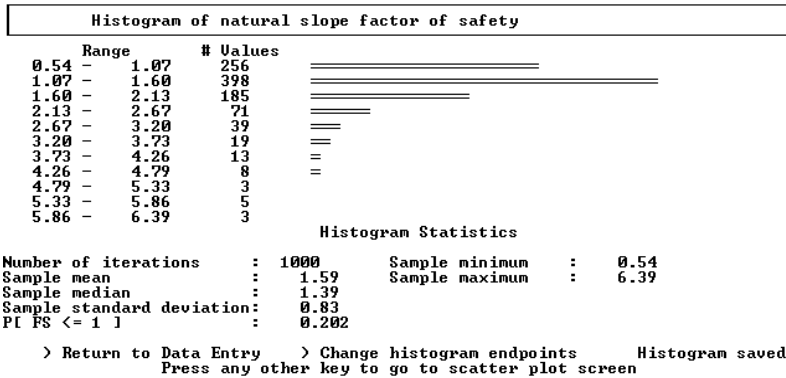


그림 5.13 안전율의 산출

5) dSLAM

dSLAM은 무한 사면모델, 운동과의 지하수 모델, 그리고 연속적인 식생 뿌리강도의 변화 모델에 근거한 물리적 기반의 사면안정 모델이다. 이 모델은 급하고 얇은 산사태와 가파른 산림지역에서 안전율의 공간적인 분포를 분석하기 위해 설계되었고 독립적인 강우사건이나 장기간의 연속적인 강우에서 실행될 수 있다.

이 모델은 전체적인 벌목이나 부분벌목 등을 포함한 실제적 혹은 가설적인 산림관리 시나리오의 영향에 대한 예측의 장점을 가지고 있으며 공간적인 데이터의 추출과 표시를 위해 윤곽선에 의한 지형학적인 분석과 지리 정보 시스템을 통합한다.

dSLAM은 주어진 시간이나 장기간의 관리기간 동안 사면 안정성에서 벌목의 영향, 주어진 기간 동안 산사태 발생 가능성 그리고 상류에서 산사태 퇴적물의 운반 등 시공간적 차원에서 사면 안정성 문제의 조사를 할 수 있다.

dSLAM은 2차원의 무한사면 안정성 모델과 SHALSTAB 모델에서의 구조와 유사한 지형학적인 요소를 통해 지하수의 운동을 운동파로 가정하는 수문학적 알고리즘을 결합한다. 그리고 알고리즘은 명백히 뿌리 구속력의 특성을 나타낸다.

SHALSTAB 모델에서는 강우의 영향을 고정된 상태로서 취급하는 반면에 이 모델에서는 공간적으로 일정하지만 시간적으로 변하는 강우(실제적인 단일 강우나 Monte Carlo 시뮬레이션에 기반을 둔 합성된 여러 강우 사건)의 입력 값을 수용할 수 있다.

그러므로 이 모델은 측정된 강우의 패턴을 가정하기 위해 시간 단계적으로 안전율을 계산해야 한다. 이 모델은 입력 값으로써 특정지역에서 흙의 특성, 식생의 유형과 연령, 그리고 각각의 강우 우량도가 필요하다.

결과적으로 이 모델은 사면 안정성 계산을 위한 많은 과정과 인자들을 생략한

SHALSTAB 모델보다 더 복잡하고, 계산 과정에 많은 시간과 노력을 소모한다.

이 모델 시뮬레이션의 결과는 지도에서 산사태와 토석류의 흐름 경로, 안전율의 분포 그리고 잠재적인 파괴의 분포를 보여준다.

6) SMORPH

SMORPH는 사면 경사와 곡률을 통하여 사면 위험성의 등급을 매겨서, 잠재된 불안정한 사면을 판별해내는 프로그램이다. 이 모델은 위험성의 등급을 매스무브먼트 잠재도가 ‘높음’, ‘보통’, ‘낮음’ 그리고 ‘얇은 토석류만 일어남’으로 분류한다.

이 모델은 사면의 경사와 형상이 얇은 산사태의 가장 중요한 인자임을 가정하였고, 다른 인자들은 모델의 보정을 통해 내재적으로 다뤄진다고 가정하였다. SMORPH는 프로그램 입력 자료로 대상지역의 DEM 데이터와 ‘사면 경사-얇은 산사태 발생 밀도’에 대한 히스토그램이 필요하다.

마. 결론

결정론적 기법의 산사태 예측 모델은 기본적으로 무한사면 안정성 공식에 수문모델을 결합하는 것을 그 기반으로 한다. 이는 무한사면 안정성 공식에 정상상태 수문모델로부터 유도된 습윤지수를 결합하여 사면에 대한 안정성을 평가, 예측 한다. 각 모델별로 어떠한 인자를 중요한 인자로 설정하였는지, 아니면 다른 모델에서는 고려하지 않은 인자를 포함시켰는지의 차이점이 존재한다. 하지만 기본적인 이론은 위에서 언급한 무한사면 안정성 공식과 정상상태 수문모델의 결합에 기반을 둔 것으로, 이는 결정론적 기법의 산사태 예측 모델들에 공통적으로 적용되는 것으로 조사되었다.

1) 모델별 지배적 인자 특성

기본적으로 무한사면 안정성 공식과 정상상태 수문모델을 이론적 기반으로 하는 여러 가지 결정론적 기법의 산사태 발생 예측 모델들은 점착력, 내부마찰각, 사면각, 흙의 단위중량, 토심, 강우강도, 토양 전도도 등의 인자들을 통하여 사면의 안정성을 평가, 예측한다. 하지만 사면의 안정성의 등급을 분류하는데 있어서 지배적인 역할을 하는 인자들에서 차이를 보이는데 이를 비교하여 정리하면 표 5.5와 같다.

표 5.5 모델별 인자적 특성 요약

구분	모델별 인자적 특성
SINMAP	-무차원 점착력의 인자와 'T/R' 인자의 상한값과 하한값을 입력받아 그것을 범위 내에서 등분포로 가정하여 사면의 안정성을 평가, 예측하였다.
SHALSTAB	-식생의 뿌리 강도가 사면의 안정성에 미치는 영향을 고려하지 않았다. -다른 모델들에 비하여 많은 과정과 인자들을 생략, 프로세스를 단순화한 특징을 가진다.
LISA	-Monte Carlo 시뮬레이션을 사용하여 1000개까지의 다른 매개변수의 조합에 대한 안전율 분포를 계산할 수 있게 하였다. -식(5.24)의 q_0 항을 통하여 안정성 지수를 산정하는 데에 식생에 의한 하중을 고려한 특징을 가진다.
dSLAM	-강우의 영향을 고정된 상태로서 취급하는 SHALSTAB 모델과는 달리, 공간적으로 일정하지만 시간적으로 변하는 강우의 입력 값을 받는다. -결과적으로 많은 과정과 인자들을 생략한 SHALSTAB 모델보다 복잡하고, 계산 과정에 많은 시간과 노력을 소모한다.
SMORPH	-사면의 경사와 형상이 가장 중요한 인자임을 가정하였다. 입력 자료로 DEM 데이터와 '사면 경사-얕은 산사태 발생 밀도'에 대한 히스토그램을 사용하는 특징을 가진다.

2) GIS와 연계성

결정론적 기법의 산사태 예측 모델 중 초기의 모델들에는 UNIX 혹은 DOS 기반의 모델들이 많았다. 그러나 GIS의 발전과 함께 산사태 예측 모델 역시 GIS tool을 이용하기 시작하였다. 대표적으로 ESRI사의 ArcView 혹은 ArcGIS를 기반으로 하고 'C++', 'Fortran'과 같은 프로그램 언어로 구성된 알고리즘을 그것의 Extension으로 개발하는 모델들이 많은 수를 차지하고 있는 것으로 조사되었다. 그것으로 인하여 넓은 대상지역에 대한 빠르고 정확한 안정성 평가의 장점 이외에도 디스플레이에서도 탁월한 기능성도 보여주고 있다.

3) 안정성 지수 등급의 분류

대부분의 모델들이 안정성 지수를 산정한 후 그것을 등급으로 분류하여 사면의 안정성을 평가하였다. 사면 안정성의 지표가 되는 등급을 분류하는 기준으로 각 모델들의 특성을 분류해 볼 수 있다.

SINMAP은 무한사면 안정성 공식에 정상상태 수문모델을 결합한 식(5.42)의 안정성 지수의 범위로 표 5.2와 같이 사면의 안정성 등급을 분류했다.

SHALSTAB은 습윤지수인 식(5.48)의 h/z 로 그림 5.6과 같이 안정성 등급을 분류했고, 또한 정상상태 수문모델을 결합하여 식(5.52)의 q/T 와 $\log q/T$ 의 값에 따른 h/z 의 안정성 등급을 분류하여 표현하기도 하였다.

3. 수문/수리 모형

가. 개요

산사태는 일반적으로 강우에 의해 발생한다. 즉, 내적으로 취약한 부분을 포함하는 사면에 강우가 적용되면 침투, 유출등 수문 과정과 모관흡수력 저하, 공극수압의 증가 등 수리적 요인이 내적 요인과 복합적으로 작용하여 발생하는 것이다. 따라서 산사태의 발생 기작을 규명함에 있어 무엇보다 선행되어야 할 것은 수문/수리 과정에 대한 명확한 이해이다.

강우에 의한 유역에서의 수문 과정을 모의하는 것은 많은 연구를 통해 검증되어왔다. 하지만 강우에 의한 자연 사면, 즉 불포화토에서의 수리특성에 대한 연구는 아직 많이 이루어지지 않고 있다.

나. 수문 모형

1) 수문순환

수문순환이란 지구 표면의 위, 아래에서 물의 끊임없는 움직임을 의미한다. 강수는 비, 눈, 우박의 형태로 내리지만 여기서는 강우만을 고려하기로 한다. 우선 비는 식물과 지표층을 적시고 난 후 지하로 침투한다. 침투율은 토지이용형태, 토양내 함수율, 강수량과 강수지속시간 등에 따라 매우 다양하다(모래층 25mm/시간, 점토나 실트층 수mm시간). 강수량이 침투량을 초과하게 되면 지표유출(overland flow)이 일어난다.

토양내 침투한 물은 토양수(soil moisture)를 형성하고 중간대를 느린 속도로 지나 포화대에 이른다. 포화대내의 물은 사면의 샘이나 하천, 호수, 바다로의 기저유출과 같은 지하수 배출이 일어나는 지점으로 수직 혹은 수평으로 이동한다.

표유출이나 지하수 배출로 하천에 도달한 물은 바다로 흘러들어 증발이 일어나 다시 수문순환을 시작한다.

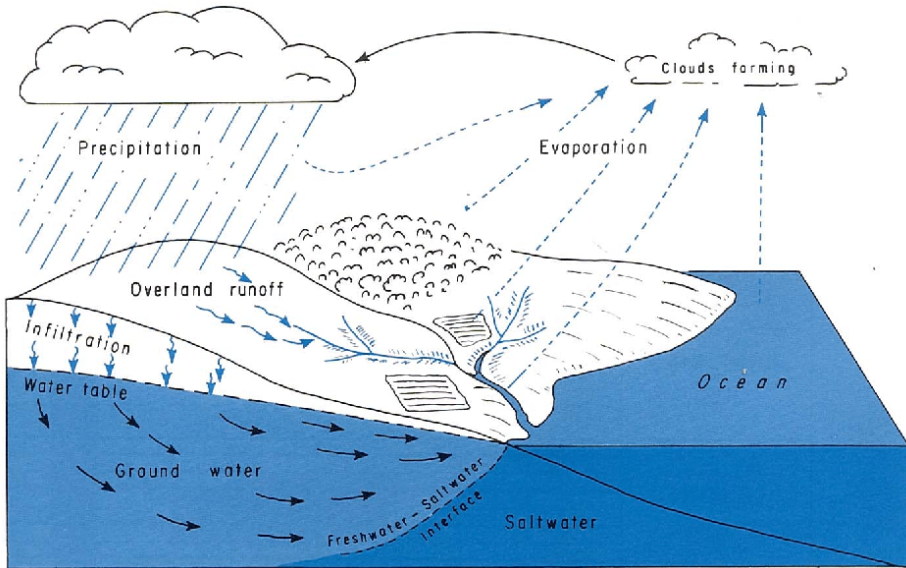


그림 5.14 수문순환과정

2) 수문 모형

가) 강우-유출모형 비교

기존 연구에 의한 강우-유출 모형을 비교하고 표 5.6에 정리하였다.

표 5.6 강우-유출모형 비교

Model Items	AnnAGNPS	ANSWER2000	ARNO	CREAMS
Agency	USDA(US)	Virginia Tech(US)	IHC(Italy)	USDA(US)
Rainfall	-지점우량 -기상관측소와 각 격자 사이의 고도차에 따른 강우 보정	-지점 우량	-지점우량 -유역평균우량	-지점우량 -유역평균우량
Interception	-	-최대 잠재 차단량 과 강우량의 관계	-	-식생피복에 의한 강우의 차단
Evaporation	-Penman Eq. -실제 증발산은 토양수분의 함수	-Penman Eq. -토양증발량: Ritchie Eq. ●토양수분량에 따라 실제증발산량 계산 ●염면적지수(LAI) -작물증산량 : Borg-Williams Eq.	-Thornthwaite -Mather Eq.(월 잠재증발산) -온도를 고려한 기준증발산량 경험식	-Priestly-Taylor Eq. -Ritchie Eq. ●염면적지수(LAI)
Runoff	-SCS 유출곡선지수 -침투유출량 -배수암거유출량 -저류층(2) 상층저류, 하층저류	-표면저류 -침투량 -강우량에서 침투되고 남은 부분이 직접유출 -통제토양역의 토양수분 함양함수 -저류층(2) 차단저류, 표면지연저류	-지표면유출은 Zhao의 토양수분 공간분포함수 -중간유출은 토양수분에 의한 비선형 함수 -지하수유출은 2변수 선형저수지 -저류층(2) 토양수분저류, 지하수저류	-SCS 유출곡선지수 -저류층(3) 차단저류, 상층저류, 하층저류
Routing	-각 격자 및 하도의 흐름해석	-연속방정식 -Manning Eq.	-linear parabolic model	-
Parameter Optimization	-	-	-	-
Landuse Change	-CN은 토지이용과 토양종류 및 수문학적 토양 특성에 좌우	-격자별 토지이용 토양 특성등 반영	-토지이용변화에 따른 지하수 변동 등 모의	-CN에 의한 토지이용의 변화 모의 가능
GIS/RS Interface	-Arc/View, GRASS	-Arc/View, Map object	-	-
Model Type	-분포형	-분포형	-준분포형	-집중형
Remark	-공개모형 -관계시스템 고려 -임의 일의 유출량은 다음날에 대한 유출계산 이전에 유역 출구지점에 도달한다 -강우사상모형인 AGNPS를 연속유출 모의모형으로 수정 -격자단위의 물리적 매개변수	-공개모형 -사용자 매뉴얼 없음 -작물의 근구역 이하의 모의 과정없이 지하수층에 대한 모의가 어려움 - 강 우 사 상 모 형 인 ANSWERS를 연속유출 모의모형으로 수정	-비공개모형 -이탈리아의 ARNO강에 적용	-공개모형 -포장단위의 소규모지구 적용

Model Items	GLEAMS	HBV96	HSPF	Mike-SHE
Agency	- USDA	- SMHI(Sweden)	- EPA, USGS(US)	- DH(Denmark)
Rainfall	- 지점우량 - 면적평균강우로 환산하여 입력	- 지점우량 - 고도에 따른 강우 분포를 고려	- 지점우량 - 소유역 별 유역 평균우량	- 지점우량
Interception	- 입면적지수 이용	- 산림지역에 차단 저류 고려	- 식생피복에 의한 차단능 고려	- 차단저류 고려 · Rutter model · K-J model
Evapotranspiration	-Penman-Monteith Eq. -Priestly-Taylor Eq. - Ritchie Eq. - 엽면적지수(LAI)	-Penman Eq. -Thornhwaite Eq. -Prestly-Taylor Eq. -토양수분함수에 의해 실제 증발산량 산정	-Class A Pan Evaporation - 잠재증발산량을 이용하여 5개의 저류층(기저유출,강우 차단, 토양상층,지하수, 토양 하층)에 의해 실제 증발산량 산정	-Penman-Moteith Eq. -The Kristensen-Jensen Eq. - 실제증발산량 · 입면적지수(LAI), 토양수 분함수 · 식물에 의한 증산 · 토양 증발 · 차단저류 증발 · 수면증발
Runoff	-SCS 유출곡선지수 -3~12개의 토양층을 사용 자가 구분 -토양 층별 토양수분추적 -저류층(3) · 차단저류 · 상층저류(경작층) · 하층저류	-2개의 토양저류층 구분 -상부토양저류층에서 직접/중 간유출(토양저류량의 함수) -하부저류층에서 기저유출 -저류층(3) · 차단저류 · 상층저류 · 하층저류	-투수지역, 불투수지역 구분 - 경사와 사면길이 등을이용하여 Chezy-Maning Eq. 과 경험식으로부터 산정 -중간유출 저류량, 감수계수 유입량의 선형함수 - 저류층(4) · 차단저류 · 요지저류 · 토양수분저류 · 지하수저류	-지면경사를 고려 -Saint Venant Eq. -Richards Eq.(1-D) -지하대수층의 3차원 흐름해 석 -저류층(3) · 차단저류 · 불포화층저류 · 포화층저류
Routing	-	- 비선형 전이함수	-하도 및 저수지의 흐름해석 - 가중계수를 이용한 경험식	- Saint Venant Eq.
Parameter Optimization	-	- 수동시행착오법 - Harlin method	- HSPEXP - HSPFParm	-
Landuse Change	- CN에 의한 토지이용의 변화 모의가능	- 고도의 분포에 따른 수문 학적 소유역의 반응단위에 의 한 토이이용 변화모의	- 소유역의 토지이용 별지형특성인자들을 사용함으로써 토지이 용 변화에 의한 유출 모의	- 지표면경사, 토지이용에 따 른 유출변화 모의
GIS/RS Interface	-	-	- BASINS(Arc/View)	- Mike-GIS(Arc-View)
Model Type	- 집중형(lumped)	- 집중형(lumped)	-준분포형 (semi-distributed)	- 분포형(distributed)
Remark	-공개모형 -포장규모에서 장기유출 및 화학물질 수치해석 -CREAMS 보다 근역을 세분화	-비공개모형 -HBV(1972)에서는 상층저류 층에서 2개의 유출공에 의해 유출을 모의한 반면 HBV96 에서는 상층저류층 의 유출공 을 1개로 해서 비선형 해석	- 공개모형	- 비공개모형 - 하천과 대수층의 흐름해석 - 격자 단위의 물리적 매개 변수

Items \ Model	SSARR	SWAT	UBC
Agency	-USACE(US)	-EPA, USDA(US)	-Univ. of British Columbia(Canada)
Rainfall	-지점우량 및 가중계수	-지점우량	-지점우량 -고도를 고려
Interception	-식생피복에 의한 차단 저류능	-차단저류능	-
Evaporation	-Pan Evaporation -Theornwaite Eq. -토양수분의 함수	-Penman-Monteith Eq. -Hargreaves Eq. -Pristley-Taylor Eq. -토양잠재증발산량에 대한 토지피복지수의 함수	-온도, 계절계수, 고도 등의 함수 -잠재증발산과 토양수분 부족량의 함수
Runoff	-토양수분지수(SMD)와 유출비율 인자(ROP)에 의해 유출계산 -저류층(4) -차단저류, 표면저류, 지표하저류, 하층저류	-SCS 유출곡선지수 -지표면 경사에 따라 CN 보정 -Green-Ampt Eq.에 의해 침투량 산정 -중간유출은 Kinematic Storage Model에 의해 산정 -저류층(5) -저류층(5) -차단저류, 토양수분저류, 연못수분저류, 앞물대수층저류, 심층대수층저류	-투수/불투수 구역의 구분 -Fast Runoff -토양수분부족량을 태운 후 직접유출에 기여 -지하수 침투의 한계값을 초과한 과잉수의 유출 -기저유출은 상층/하층 지하수 저류층과 저류계수에 의해 선형적으로 산정 -중간유출은 중간저류층과 저류계수에 의해 산정 -저류층(2) -상층저류, 하층저류
Routing	-유역추적:선형 저수지 -하도추적:비선형 저수지	-선형저류합수	-선형저류방정식 Fast, Medium-계단식 저류 Groundwater-단순선형저류
Parameter Optimization	-	-토양 및 토지이용에 따른 매개변수 데이터 베이스	-
Landuse Change	-	-수문반응단위 별 토지 이용변화에 의한 유출모의	-
GIS/RS Interface	-	-GRASS -Arc/View(ASWAT) -BASINS	-
Model Type	-준분포형	-준분포형	-집중형
Remark	-공개모형 -저수지 운영에 활용	-공개모형	-비공개모형

Model Items	MODHYDROLOGY	EPIC	XINANJIANG
Agency	-Melbourne Univ. (Australia)	USDA(US)	-Ho-Hai Univ.(China)
Rainfall	- 지점우량	-지점우량	-유역평균우량
Interception	- 차단저류 고려	-	-
Evapotranspiration	-잠재증발산량 입력 -실제증발산량 · 토양수분의 함수	-Penman Eq. -Priestly-Taylor Eq. -Penman-Monteith Eq. -Hargreaves and Samani Eq. -Ritchie Eq. ●엽면적지수(LAI)	-Pan Evaporation -잠재증발산과 토양수분 보유능의 함수
Runoff	-요지저류로부터 지표면 유출 -토양수분저류에서 중간 유출 -지하수저류에서 기저유출 · 저류층(5) · 차단저류 · 요지저류 · 토양수분저류 · 하도저류 · 지하수저류	-SCS 유출곡선지수(경사를 고려한 CN) -저류추적 -저류층 토양수분저류, 상층저류, 하층저류	-부수/불투수 구역의 구분 -자유수분저류량과 기저유출은 자유수분 저류량과 계수에 의해 산정 -저류층(3) 상층저류, 하층저류, 침층저류
Routing	- 비선형 저류함수	-	-Muskingum
Parameter Optimization	-	-	-
Landuse Change	-	-CN에 의한 토지이용의 변화 모의 가능	-토지이용 변화에 따른 매개변수의 재산정 곤란
GIS/RS Interface	-	-	-
Model Type	- 집중형(lumped)	-집중형	-집중형
Remark	- 비공개모형 - 하천으로부터의 재충전(하도저류에 서 지하수 저류로의 재충전)을 고려 - 지하수 하부로의 침투 고려	-공개모형 -작물성장고려 -포장단위의 소규모지구 적용	-비공개모형 -NWSRS 부프로그램으로 활용

나) GIS 시스템과의 연계성

수리수문 모형의 효율적이고 종합적인 계산을 위하여 GIS의와의 연계성이 중요시되고 있다. 각 수문모형의 GIS 시스템과의 연계성은 표 5.7과 같다.

표 5.7 GIS 시스템과의 연계성

모델 \ 구분	GIS/RS 기반	모사종류	지역범위	공개 여부	비 고
AnnAGNPS	-Arc/View GRASS	single event	Rural	공개	농업유역의 유출과 유출수의 수질, 유사량 추정하기 위해 개발
ANSWER 2000	-Arc/View Map object	single event	Rural	공개	사용자 매뉴얼 없음
HSPF	-BASINS Arc/View	continuous	Rural/Urban	공개	최근 많이 사용
SWAT	-GRASS Arc/View	continuous	Rural	공개	최근 많이 사용

다. 수리모형

1) 일차원 침투이론

불포화토 내의 물과 공기는 동일한 유체로 취급된다. 유체의 흐름은 포텐셜 기울기에 의해 발생하는 추진포텐셜(driving potential) 때문에 흐른다. 추진포텐셜은 수두 개념으로 표시 할 수 있으며 위치 수두와 압력수두를 합친 전수두의 동수경사의 차에 의해 발생한다. 불포화토내 물의 흐름에는 Darcy의 법칙을 확장 적용한다(Buckingham, 1907; Richard. 1931; Childs and Collins-George, 1950). 그러나 불포화토의 투수계수는 일정하지 않고 함수비 및 모관흡수력과 함수관계를 가지는 변수이다. Childs(1969)는 불포화토 내의 공기가 흡입자와 비슷한 거동을 한다고 가정하고 흡을 함수비가 줄어든 포화도로 취급한다. 불포화토의 투수계수는 포화도와 체적함수비가 중요한 함수이다. 모관 흡수력의 변화가 함수비와 투수계수에 대한 많은 반경험적 공식은 흡수력과 포화도곡선이나 함수특성 곡선을 사용하여 유도 될 수 있다. 다공질체내 물의 이동속도는 전수두 기울기인 동수경사에 비례한다는 사실은 Darcy(1865)에 의해 발견되는데, 이는 층류의 흐름에 한하여 폭넓게 적용된다. 등방성인 흙에서 Darcy의 법칙은 다음과 같다.

$$q = -k \nabla h \quad (5.53)$$

여기서, q = 단위 면적 유량(specific flux)

k = 투수 계수(coefficient of permeability)

h = 전수두(hydraulic head)

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$$

투수계수는 흙의 특성을 나타내고 있고 뿐만 아니라 물의 특성도 나타낸다. 식(5.53)을 미분하면, 식(5.54)으로 나타낼 수 있다.

$$q = -k \frac{dH}{dZ} \quad (5.54)$$

여기서, q 는 유량(cm^3), k 는 투수계수(cm/sec), H 는 전수두, z 는 흐름 방향의 거리로 나타난다. Buckingham (1907)은 식(5.54)를 수정하여 다음 식(5.55)를 유도하였다.

$$q = -k(\theta) \left[\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right] \quad (5.55)$$

여기서, k 는 불포화 투수계수(unsaturated coefficient of permeability)이고, h 는 물의 압력수두이고, θ 는 흙의 체적 함수량이다.

침투는 지표를 통해 물이 흙 속으로 들어가는 물리적인(Richards, 1931) 과정을 말하면 침투량은 불포화 지반의 함수량 조건, 간극수압, 투수계수 등에 따른 물의 재분포에 의해 결정된다. 이때 Darcy의 법칙과 연속방정식으로부터 일차원 연직 흐름에 대한 지배방정식은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (5.56)$$

다음과 같이 깊이에 따라 일정한 초기 조건을 가정하면 경계조건에 따라 식(5.56)의

해가 결정된다.

초기조건:

$$\theta(z, 0) = \theta_0, \quad t = 0 \text{ for } z \geq 0 \quad (5.57)$$

경계조건:

$$\theta(0, z) = \theta_1, \quad z = 0 \text{ for } t \geq 0$$

$$h(0, z) = h_1, \quad z = 0 \text{ for } t \geq 0 \quad (5.58)$$

여기서, h_1 은 지표에서의 압력수두, θ_1 은 이에 해당하는 체적함수량이다. 이 경우 누적 침투량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I(t) = k_0 t + \int_0^{z_w} [\theta(z, t) - \theta_0] dz \quad (5.59)$$

가) Lumb 습윤대법

평평한 지표면에서 포화투수계수 값보다 큰 강우가 작용하면 막 포화된 지반의 침투율은 포화투수계수의 값과 같다고 볼 수 있다. 이때 포화된 지반과 아래 부분의 불포화된 부분사이에 명확한 침윤전선을 가정하면 침윤전선의 침투깊이는 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Lumb, 1975).

$$z_w = \frac{K_s t}{n(S_f - S_o)} = \frac{K_s t}{\Delta \theta_i} \quad (5.60)$$

여기서 n 은 간극비, S_o , S_f 는 각각 초기 상태와 최종 상태의 포화도이며 $\Delta \theta_i$ 는 함수량결손 그리고 K_s 는 포화투수계수이다.

나) Green-Ampt 모델

침투식은 Richard's 식의 근사해로부터 발전되었고, Green-Ampt(1911) 침투모델 그림 5.15와 같다.

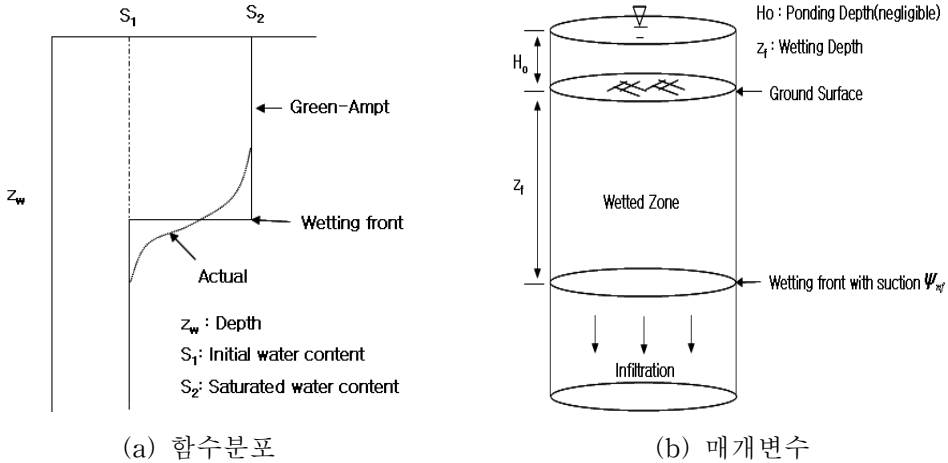


그림 5.15 Green and Ampt 모델

그림 5.15 (a)에서 Wetting zone 아래에 경계면은 습윤전선(Wetting front)이고, 습윤전선은 침투가 시작 한 후에 t동안 깊이 L만큼 침투한다. 수위는 흙 표면 위에서 깊이 h_0 만큼 나타난다.

수직 Column의 흙의 단위 수평적인 횡단면을 고려하고(그림 5.11), 부피는 깊이 L과 표면 사이의 습윤 흙 둘레를 경계면으로 습윤전선이 통과 했을 때 함수량은 간극률(ϕ)에서 초기 함수량부터 증가 할 것이다. 함수량(θ)은 제한된 표면의 부피 내외의 범위에서 습윤함유량의 부피의 비를 나타낸다.

따라서 증가된 함수량 내에서 제한된 부피 내외에서 축척되고 침투된 결과가 바로 $L(\phi - \theta_i)$ 이다. 물이 흙 안에 침투되어 축척된 깊이, 즉 누적침투능(F)은 다음 식(5.61)로 구한다.

$$F_t = L(\phi - \theta_i) = L\Delta\theta \quad (5.61)$$

또한 Darcy's 법칙은 식(5.62)과 같다.

$$q = -k \frac{\delta h}{\delta z} \quad (5.62)$$

이 경우는 Darcy의 흐름에서 q 는 깊이가 일정하고 침투비(f)도 일정하다. 그 때문에 q 가 위쪽을 흐르는 동안 물의 침투비는 아래쪽을 향한다. 습윤전선의 건조된 면 위쪽에서, 식(5.61)은 다음과 같이 근사식으로 표현 할 수 있다.

$$f = k \left[\frac{h_1 - h_2}{z_1 - z_2} \right] \quad (5.63)$$

지표면에서 수두 h_1 은 깊이 h_0 와 같다. 수두 h_2 은, 건조한 흙 아래 습윤전선은 $-\psi - L$ 과 같다. 식(5.63)에 대입하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$f = k \left[\frac{h_1 - (\psi - L)}{L} \right] \approx k \left[\frac{\psi + L}{L} \right] \quad (5.64)$$

만약 깊이 $h_0 = 0$ 이면 ψ 과 L 을 무시해도 좋다. 이 가정은 표면 수위 수문학 문제에 흔히 사용되고 이 가정은 고인 물이 지표수이기 때문이다. 후에, 만약 지표수를 무시한다면, 식(5.65)과 같다. 습윤전선 깊이 $L = F/\Delta\theta$ 이고 $h_0 = 0$ 을 식(5.63)에 대입하면, 식(5.65)과 같다.

$$f = k \left[\frac{\psi \Delta\theta + F}{F} \right] \quad (5.65)$$

그리고 $f = dF/dt$ 이므로 식(5.62)은 다음 식(5.66)과 같다.

$$\frac{dF}{dt} = k \left[\frac{\psi \Delta\theta + F}{F} \right] \quad (5.66)$$

이를 정리하면

$$\left[\left(\frac{F}{F + \psi \Delta \theta} \right) \right] dF = k dt \quad (5.67)$$

이 되고, 왼쪽 항을 분할하여 나타내면

$$\left[\left(\frac{F + \psi \Delta \theta}{F + \psi \Delta \theta} \right) - \left(\frac{\psi \Delta \theta}{F + \psi \Delta \theta} \right) \right] dF = k dt \quad (5.68)$$

된다. 이를 다시 적분하면,

$$\int_0^{F_t} \left(1 - \frac{\psi \Delta \theta}{F + \psi \Delta \theta} \right) dF = \int_0^t k dt \quad (5.69)$$

$$F(t) - \psi \Delta \theta \ln [F(t) + \psi \Delta \theta] - \ln(\psi \Delta \theta) = kt \quad (5.70)$$

또는

$$F(t) - \psi \Delta \theta \left(1 + \frac{F(t)}{\psi \Delta \theta} \right) = kt \quad (5.71)$$

식(5.70) 또는 식(5.71)이 구해진다. 이와 같이 구한 Green-Ampt 식은 누적적인 침투 식이며 식(5.73)에서 누적침투능(F)을 알 수 있다. 침투비(f)는 식(5.73)에서 얻을 수 있고, 다음 식(5.72)에서도 얻을 수 있다.

$$f(t) = k \left(\frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right) \quad (5.72)$$

지표수 h_0 를 무시할 수 없을 때, $\psi - h_0$ 값은 식(5.72)과 식(5.71)에서 ψ 의 적당한 값을 구한다. F 는 식(5.73)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F(t) = z_w \Delta \theta = kt + \psi \Delta \theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\psi \Delta \theta} \right) \quad (5.73)$$

다) Chu Model

Green and Ampt(1911)는 지표는 ponding되어 있고 습윤전선(wetting front)의 상·하부는 분명하게 구분되며 습윤전선에서의 모관력 및 깊이에 따른 초기 체적함수비(volumetric water content, θ_0)가 일정하다는 가정 하에 Darcy의 법칙을 이용하여 침투 모델을 제시하였다.

Chu and Marino가 제안한 침투 모델의 지반 조건은 N_c 개의 층으로 구성되어 있으며 각각 K_1, K_2, \dots, K_{N_c} 의 투수계수와 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N_c}$ 의 초기 체적함수비를 갖는다. 이를 그림 5.16에 나타내었다. 비정상 강우에 대한 침투 해석은 Chu(1978)가 제안한 방법과 동일하며 ponding이 발생할 경우와 발생하지 않을 경우로 나누어 해석하게 된다. 강우강도를 i , 지반의 침투능을 f 라 하면 강우 발생 후 n 층에서의 침투는 다음과 같다.

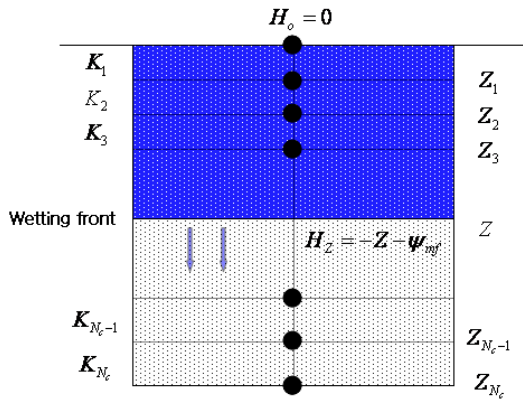


그림 5.16 Chu and Marino의 침투모델

① $i \geq f$ 일 경우 (surface ponding case)

$Z_{n-1} < z \leq Z_n$ 일 때

$$f_z = \frac{z + \psi_{mf_n}}{\sum_{j=1}^{n-1} \frac{Z_j - Z_{j-1}}{K_j} + \frac{z - Z_{n-1}}{K_n}} \quad (5.74)$$

$$F_z = F_{Z_{n-1}} + (z - Z_{n-1})\Delta\theta_n = \sum_{j=1}^{n-1} (Z_j - Z_{j-1})\Delta\theta_j + (z - Z_{n-1})\Delta\theta_n \quad (5.75)$$

$$z = \frac{F_z - F_{Z_{n-1}}}{\Delta\theta_n} + Z_{n-1} \quad (5.76)$$

$$t_z = t_{n-1} + \frac{\Delta\theta_n}{K_n}(z - Z_{n-1}) + \Delta\theta_n \left[\sum_{j=1}^{n-1} Z_j \left(\frac{1}{K_j} - \frac{1}{K_{j+1}} \right) - \frac{\psi_{mf_n}}{K_n} \right] \ln \frac{z + \psi_{mf}}{Z_{n-1} + \psi_{mf}} \quad (5.77)$$

여기서, Z_j : j 층의 깊이 [L],

K_j : j 층에서의 포화투수계수 [LT^{-1}],

z : 포화깊이 [L],

ψ_{mf_n} : n 층의 습윤전선에서의 모관흡수력 [L],

F_z : z 까지의 총누적침투량 [L],

t_z : 깊이 z 까지 침투하는데 걸리는 시간 [T],

t_{n-1} : $n-1$ 층까지 침투하는데 걸리는 시간 [T].

② $i < f$ 일 경우 (non-ponding case)

Non-ponding의 경우 지반의 침투능은 강우강도와 동일하며 강우는 모두 지반으로 침투하여 piston flow를 형성한다.

$$f_z = i \quad (5.78)$$

$$F_z = F_{Z_{n-1}} + \int_{t_{n-1}}^t i dt \quad (5.79)$$

$$z = \frac{F_z - F_{Z_{n-1}}}{\Delta\theta_n} + Z_{n-1} \quad (5.80)$$

라) Pradel-Raad 모델

(1) Green-Ampt 모델의 해

주어진 조건하에서 지반 내 임의면을 통한 최대 침투강우량을 침투능이라 하면 침투가 진행함에 따라 그 값은 시간에 따라 변해서 최소값에 접근할 때까지 감소한다. 이때 침투능 곡선 아래 면적을 흡의 누적 침투능(cumulative infiltration capacity, F)이라 하며 임의의 시간동안 주어진 흡이 흡수할 수 있는 단위면적당 최대부피를 의미한다.

일반적으로 누적침투능(cumulative infiltration capacity)과 $F = dF/dt$ 로 정의되는 침

투능(infiltration capacity)에 대하여 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\lim_{t \rightarrow 0} F(t) = 0 \quad \text{그리고} \quad \lim_{t \rightarrow 0} F(t) = 0 \quad (5.81)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} F(t) = \infty \quad \text{그리고} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = k_1 \quad (5.82)$$

여기서 k_1 은 지표에서의 경계조건에 대응하는 투수계수이며 지표면이 포화상태에 도달하면 포화투수계수(k_s)상태가 된다.

지표를 통해 침투할 수 있는 물의 양은 흙의 함수 특성, 흙의 불균질성, 포화도 등에 연관되어 있으며 균질한 흙을 통한 일차원 연직 침투에 대한 많은 해석적, 경험적인 식들이 제안되었다(Green과 Ampt, 1911; Horton, 1940; Philp, 1957; Mein과 Larson, 1973).

Green과 Ampt는 해석적인 방법에 의해 침투능을 구하기 위해 1차원적 연직 흐름에 기초를 둔 간략해를 제안하였다. 이 모델은 일차원 연직 흐름, 침윤 전선에서의 일정한 습윤전선, 그리고 습윤 전선 위 부분에서의 함수량 결손과 투수계수가 일정하다는 가정을 바탕으로 하고 있다. 누적 침투능은 Green과 Ampt(1911)가 구한 식(5.61)과 동일하다. 그리고 시간 t 에서의 침투능은 누적침투량으로부터 다음과 같이 Green과 Ampt(1911)가 구한 식(5.73)과 동일하다. 따라서, 식(5.73)으로부터 깊이 z_w 까지 지반을 포화시키기 위해 필요한 시간은 다음과 같음을 알 수 있다.

$$T_w = \frac{\Delta\theta}{k} \left[z_w - \psi \ln \left(\frac{\psi + z_w}{\psi} \right) \right] \quad (5.83)$$

(2) Pradel & Raad Method

Darcy의 법칙을 기초로 침투에 대한 간단한 모델이 Green과 Ampt(1911)에 의해 제시되었다. 이 모델은 불포화된 흐름을 토대로 한 정확한 접근에 비교해 볼 때 매우 합리적인 예견이다(Wallace) 1975).

그들은 Green-Ampt모델과 관련된 많은 조사 보고서 중에서 Brakensiek(1977)의 연구 보고서에 기초하여 모델을 제안하였다. 이 모델은 다음 가정을 기초로 한다.

- (1) 흙의 표면이 계속적으로 젖어 있다.
- (2) 뚜렷한 Wetting front가 있다.
- (3) Wetting zone내 투수계수 k 는 시간에 따라 변하지 않는다.
- (4) Wetting zone 위에는 일정한 음(negative)의 토압이 있다.

이 모델에 따라 지반내 z_w 깊이까지 포화되는데 필요한 시간은 식(5.83)을 사용하여 구할 수 있다.

지속시간은 z_w 까지 지반이 포화되는데 걸리는 최소시간보다 큰 값이므로 이를 $T_{\min} = T_w$ 로 하여 관계식을 유도하면 된다.

$$T_{\min} = \frac{\Delta\theta}{k} \left[z_w - \psi \ln \left(\frac{\psi + z_w}{\psi} \right) \right] \quad (5.84)$$

여기서 k =투수계수, ψ =모관흡수력, z_w =침투심도(m), $\Delta\theta$ =함수량결손, $T_{\min}=z_w$ 까지 이르는데 걸리는 시간(min)

$\Delta\theta$ 는 젖기 전과 후에 수분 함유량 차이 즉, $\theta_w - \theta_i$ 의 차이점으로 나타낼 수 있다. 그러므로 간극률에서 초기 수분 함유량 θ_i 의 영향은 중요하고 T_w 값에 주요한 영향력을 미친다.

침투율 V_i 는 물이 흙 표면에 스며드는 속도이다.

$$V_i = k_w \frac{\psi + z_w}{z_w} \quad (5.85)$$

흙이 포화 상태에 도달해야만 한다. 포화되기 위한 첫 번째 조건은 강우강도(I)가 침투율 V_i 보다 더 커야만 한다. 두 번째 상태는 강수량 T_w 보다 더 오래 지속되어야만 한다. 그러므로 이 조건들은 $T \geq T_w$ 와 $I \geq V_i$ 와 같이 나타낼 수 있다. 이 가정은 z_w 깊이 까지의 포화되기 위한 최소한의 필요조건이다.

$$\begin{aligned} T_{\min} &= T_w \\ I_{\min} &= V_i \end{aligned} \quad (5.86)$$

식 (5.84)과 식(5.85), 식(5.86)를 결합해 I 와 T (강우지속시간)를 포함하는 식으로 나타내면 다음 식(5.87)과 같다.

$$I = \frac{\Delta\theta}{T} \left[z_w - \psi \ln \left(\frac{\psi + z_w}{\psi} \right) \right] \left(\frac{z_w + \psi}{z_w} \right) \quad (5.87)$$

실제 깊이에 있어서 실제 강우에 의해 이 지반이 포화되는지 아닌지 검토할 필요가 있으므로 지반의 투수계수가 한계투수계수(k_{lim})보다 작으면 지반은 포화되지 않는다고 가정하여 Pradel과 Raad(1993)에 의해 다음과 같은 식(5.88)이 제안되었다.

$$k_{lim} = I_{lim} \left(\frac{z_w}{z_w + \psi} \right) = \frac{\Delta\theta}{T_{min}} \left[z_w - \psi \ln \left(\frac{\psi + z_w}{\psi} \right) \right] \quad (5.88)$$

마) Mein-Larson 모델

Mein과 Larson(1973)은 균일한 강우강도에 의한 폰딩발생과 그 이후의 침투에 대한 해를 구하는 방법을 제안하였다. 즉, 침투의 초기에는 강우가 지반으로 모두 침투할 수 있지만 침투능이 강우강도와 같아지게 되면 지표면에서의 수압이 0이 되면서 폰딩이 발생한다. 일정한 강우 강도를 가정하면 Green-Ampt 모델로부터 누적침투량은 다음과 같으며 이에 대응하는 침윤전선의 깊이는 강우강도의 함수이다.

$$F_p = \frac{K\Delta\theta\psi_f}{i(i - K_s)} \quad (5.89)$$

$$z_w = \frac{K_s\psi_f}{(i - K_s)} \quad (5.90)$$

또한 이에 대응하는 시간은 다음과 같다.

$$t_p = \frac{F_p}{i} \quad (5.91)$$

폰딩 발생 후 침투능의 감소는 누적침투량에 따라 식(5.72)를 따른다.

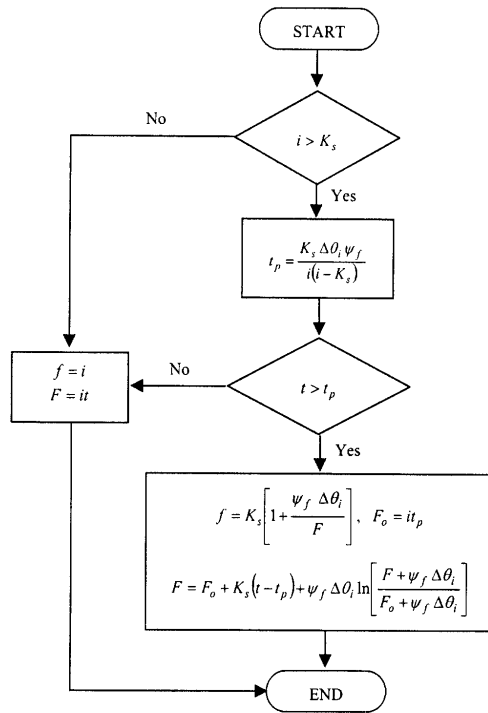


그림 5.17 Mein과 Larson 모델

제 3 절 유발인자 영향 규명

1. 개요

자연 사면의 경우 지하수위의 위치에 따라 포화영역과 공기와 물의 접촉면을 포함하는 4상 구조(solids, water, air, contractile skin)를 가진 불포화 영역으로 나눌 수 있다. 자연사면의 불포화 지반은 흙 입자와 물-공기 사이의 모세관 현상 등의 작용으로 인하여 포화토와는 매우 다른 거동특성을 나타낸다. 따라서 자연사면의 거동을 해석하는데 있어 불포화토에 대한 이론 연구가 선행되어야 한다.

본 장에서는 불포화토의 특성과 이러한 특성을 반영한 사면안정 해석이론, 침투이론 등에 대해 연구하여 향후 사면안정성 시스템의 개발에 적용하기 위하여 불포화토 특성 중 불포화 상태로 존재하는 자연사면의 안정을 규명하기 위해 반드시 고려해야 하는 지반의 고유 특성인 함수특성곡선과 강도특성을 분석하기 위한 시험을 실시하고 분석하였다. 그리고 이를 바탕으로 침투특성이 사면안정에 미치는 영향을 보다 정확하게 규명하기 위하여 Green and Ampt 모델을 기반으로 한 Chu 모델에 수분재분포를 고려하여 수정된 침투모델을 제안하였다. 지형의 기복, 경사도, 고도 등 지형 인자가 사면안정에 미치는 영향을 분석하였으며 기존의 연구에서 적용하기 힘들었던 지형의 기복을 분석하기 위하여 지형도의 프랙탈 차원 이론을 적용하였다. 또한 식생의 뿌리는 강우에 의한 침식이나 붕괴를 방지하기 위하여 중요한 영향을 미치는 인자로 인식되기 때문에 식생이 사면안정에 미치는 영향에 관하여 연구하였다.

2. 토질인자 영향 분석

가. 수문현상에 의한 자연사면 거동 분석

1) 자연사면 거동에 대한 이론 연구

가) 목적

자연 사면의 경우 지하수위의 위치에 따라 포화영역과 불포화 영역으로 나눌 수 있다. 따라서 자연사면의 거동을 해석하는데 있어 불포화토에 대해 연구하여 불포화토의 특성을 반영한 사면안정 해석이론, 침투이론 등에 대해 연구하여 향후 사면안정성 시스템의 개발에 적용하기 위함이다.

나) 이론적 배경 불포화토의 특성

불포화토의 경우에는 모관흡수력이 지반의 거동특성에 매우 중요한 역할을 하는 설계 변수이다. 따라서 불포화토와 관련된 흐름특성, 변형특성 및 강도특성을 적절히 고려하기 위해서는 이들 거동특성에 대한 모관흡수력의 영향을 반드시 고려해야 한다.

(1) 강도 특성

일반적으로 Mohr-Coulomb규준에 의해 표현되는 포화토의 전단강도는 사면안정해석, 지지력, 토압, 그리고 PMT, SPT과 같은 현장 데이터의 분석 등의 문제를 적용된다. 그러나 흡인력과 관련된 불포화토의 전단강도는 지난 수십 년 동안 많은 연구자들에 의해 고려되어 왔다. 불포화토의 거동은 흡인력을 고려함으로써 보다 더 합리적으로 예측할 수 있다.

(가) Bishop(1959)의 제안식

Bishop(1959)은 포화토에 대한 유효응력의 확장된 Terzaghi의 원리를 이용하여 불포화토에 대한 전단강도 방정식을 제안하였다. Bishop의 방정식은 식(5.92)와 같이 표현된다.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)[(\chi)(\tan\phi')] \quad (5.92)$$

여기서, τ 는 파괴시 전단강도, c' 는 유효점착력, ϕ' 는 마찰각, $(\sigma_n - u_a)$ 는 순응력, $(u_a - u_w)$ 는 흡인력, χ 는 포화도와 관련된 상수를 의미한다.

χ 의 값은 1부터 0까지로 변화하며, 완전하게 포화된 상태에서 완전하게 건조될 때까지를 대표한다.

(나) Fredlund(1978)의 제안식

Fredlund는 두 개의 독립적인 응력 변수에 의한 불포화토의 전단강도를 설명하기 위하여 식(5.93)과 같은 방정식을 소개하였다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (5.93)$$

여기서, τ_f 는 파괴시 전단강도, c' 는 유효점착력, ϕ' 는 마찰각, ϕ^b 는 흡인력과 관련된 전단강도의 증가분, σ 는 전응력, u_a 는 간극공기압, u_w 는 간극수압, $(\sigma - u_a)$ 는 순구속응력, $(u_a - u_w)$ 는 흡인력을 의미한다. 모든 흡인력에 대한 마찰각(ϕ')은 포화된 흙에 대한 전단강도 실험으로부터 얻어진 유효마찰각과 같다고 가정한다. 이전의 연구에서 보면 낮은 흡인력에서 ϕ^b 는 ϕ' 와 같으나 높은 흡인력에서는 더 낮은 값을 보인다. 즉, 겉보기 점착력은 흡인력의 함수로서 비선형으로 나타난다. 겉보기 점착력의 변화는 비선형의 겉보기 점착력에 의하여 고려된 포물선 형태로서의 공식화가 되었다.

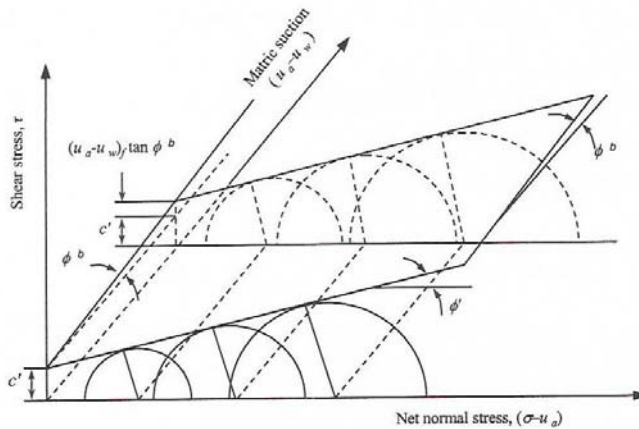


그림 5.18 Mohr-Coulomb의 파괴가설을 불포화토까지 확장한 파괴규준 (Fredlund and Rahardjo, 1993)

(2) 수리 특성

(가) 함수 특성 곡선

함수특성곡선은 지반의 고유특성으로 지반 불포화 특성을 결정하는 매우 중요한 기본물성이라 할 수 있다. 함수특성곡선은 흙 속에 존재하는 물의 양과 모관흡수력의 관계로 정의되고, 물의 양은 중량함수비, 체적함수비, 또는 포화도로 나타낼 수 있으며 일반적으로는 체적함수비와 모관흡수력의 관계로 표현된다. 전형적인 함수특성곡선의 모양은 그림 5.19와 같이 S자 형태를 보인다.

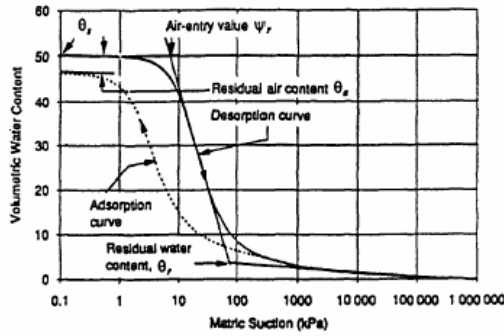


그림 5.19 전형적인 함수특성 곡선(SWCC)

불포화토의 흡-수분 특성곡선은 여러 연구자에 의하여 제안되었으며, 실험결과를 바탕으로 검증되었다. 그러나, 주로 자연상태의 시료를 사용하여 흡의 함수상태, 입도분포 등을 고려하여 특성 곡선식을 유도하였다.

다음은 제안된 특성 곡선식 중에서 가장 많이 인용되고 있는 것으로 주로 입도와 실험결과를 바탕으로 상수나 계수를 도출하여 적용하도록 유도되었다.

① Brooks and Corey(1964)의 제안식

Brooks and Corey(1964)의 방정식은 흡수력과 포화도 사이의 관계를 만족시키는 간극크기 분포를 가진 흡에도 적용할 수 있는 범위가 있는데, 흡수력과 포화도 사이의 관계를 도출하기 위하여 유효포화도(S_e) 및 잔류포화도(S_r)의 개념을 도입하여 상수를 계산할 수 있는 식을 제안하였다.

유효 포화도는 다음 식으로 표현되며

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad \text{for } U_a - U_w < (U_a - U_w)_b \quad (5.94)$$

$$S_e = \left[\frac{(U_a - U_w)_b}{U_a - U_w} \right]^\lambda \quad \text{for } U_a - U_w > (U_a - U_w)_b \quad (5.95)$$

여기서, S_e 는 유효포화도, S_r 은 잔류포화도, $(U_a - U_w)_b$ 는 공기함입저항값(air entry value in kPa), λ 는 흡의 잔류함수비에 관계되는 상수, $(U_a - U_w)$ 는 흡인력(suction in kPa)이다.

② Genuchten(1980)의 제안식

Genuchten(1980)은 Mualem(1976)의 이론을 바탕으로 이미 알고 있는 흙-수분 특성곡선과 실험결과를 대입하여 다음과 같은 특성곡선식을 제안하였다. 이는 Brooks 등이 제안한 유효포화도 개념을 대입하여 도출된 특성식과 같은 결과를 나타낸다.

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{h}{a}\right)^b\right]^c} \quad (5.96)$$

여기서, a는 공기유입값에 관계되는 토질상수, b는 흙에서 수분이 빠져나가는 것과 관계되는 토질상수, c는 잔류함수비에 관계되는 토질상수이다.

③ Fredlund and Xing(1994)의 제안식

Fredlund 등(1994)은 1,000,000 kPa이면 체적함수비가 0이 된다는 가정 하에서 타 연구자의 결과를 분석하여 다음과 같은 특성곡선식을 제안하였다.

$$\theta_w = C(h) \left[\frac{\theta_s}{\left[\ln \left\{ \exp(1) + \left(\frac{h}{a}\right)^b \right\} \right]^c} \right] \quad (5.97)$$

$$C(h) = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{h}{h_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{h_r} \right)} \right] \quad (5.98)$$

여기서, a는 공기유입값에 관계되는 토질상수, b는 흙에서 수분이 빠져나가는 것과 관계되는 토질상수, c는 잔류함수비에 관계되는 토질상수, hr은 잔류함수비일때의 흡인력을 의미한다.

(나) 흙-수분특성곡선과 불포화도의 전단강도 사이의 관계

흙-수분 특성곡선은 흡인력과 포화도 또는 함수비 또는 체적함수비 사이의 관계를 설명한 것이다. 흙-수분 특성곡선은 불포화도의 거동을 이해하는데 가장 기본이 된다.

흙이 포화상태부터 건조상태까지 이동하므로 흙, 공기, 물 상태의 변화는 응력상태를 변화시킨다.

① Vanapalli and Fredlund (1996) 제안식

Vanapalli and Fredlund (1996) 등은 흙-수분 특성곡선과 포화 전단강도 상수를 이용하여 불포화토의 전단강도를 예측하기 위한 비선형 함수를 제안하였다.

$$\tau = [c' + (\sigma_n + u_a)\tan\phi'] + [(u_a - u_w)(\Theta^\kappa)(\tan\phi')] \quad (5.99)$$

여기서, κ 는 측정되거나 예측된 값 중 가장 적당한 상수, Θ 는 함수비(Θ_w/Θ_s)를 의미한다.

② Vanapalli(1996)의 제안식

Vanapalli(1996)는 κ 값을 사용하지 않고 불포화토의 전단강도 예측을 위한 방정식을 제안하였다.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\left[\left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)\tan\phi'\right] \quad (5.100)$$

여기서, θ_w 는 체적함수비, θ_s 는 포화 체적함수비, θ_r 은 잔류 체적함수비이다.

식(5.100)는 포화도, 함수비에 의해 표시될 수 있으며 비슷한 결과의 전단강도를 얻을 수 있다. 잔류체적함수비는 흙-수분 특성곡선으로부터 측정될 수 있다.

③ Oberg and Sallfors(1997)의 제안식

Oberg and Sallfors(1997)은 모래와 실트 같은 비점성분 흙의 전단강도 예측을 위한 방정식을 제안하였다.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)[(S)(\tan\phi')] \quad (5.101)$$

식(5.101)은 Bishop에 의해 제안된 χ 값을 포화도로 대신 할 수 있으며, 공시체의 파괴점에서 포화도와 전단강도의 측정을 통해 실험적으로 증명될 수 없다.

④ Khallili and Khabbaz(1998)의 제안식

Khallili and Khabbaz(1998)은 불포화토의 전단강도 예측을 위해 Bishop의 제안식을 확장하였으며, χ 값은 항상 일정하다고 하였다.

즉, Bishop의 제안식인 $\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)[(\chi)(\tan\phi')]$ 에서

$$\chi = \frac{(u_a - u_w)_f}{(u_a - u_w)_b}^{-0.55} \quad (5.102)$$

여기서, $(u_a - u_w)_f$ 는 파괴시 흡인력이다.

Khallili and Khabbaz(1998)의 접근 방법을 근거로 한 불포화토의 전단강도 예측을 위해 요구되는 상수는 공기함입저항치 즉, $(u_a - u_w)_b$ 와 포화 전단강도 상수가 있다.

⑤ Bao등(1998)의 제안식

Bao등(1998)은 흙-수분 특성곡선의 변이구간(transition zone)에서의 선형적 변이의 설명하기 위한 불포화토의 전단강도 예측을 위한 방정식을 제안하였다.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)[\xi - \zeta \log(u_a - u_w)]\tan\phi' \quad (5.103)$$

여기서, $\xi = \frac{\log(u_a - u_w)}{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)_b}$, $\zeta = \frac{1}{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)_b}$, $(u_a - u_w)_r$ 은 잔류 함수비 상태에서의 흡인력을 의미한다. ξ 는 가로축의 절편을 대표하고 ζ 는 흙-수분 특성곡선에서의 선형부분의 기울기를 대표한다. 또한, Bao(1998)은 흙-수분 특성곡선에서 적당하게 표현될 수 있는 식을 제안하였으며 식은 아래와 같다.

$$\frac{\theta_w - \theta_s}{\theta_s - \theta_r} = \xi - \zeta \log(u_a - u_w) \quad (5.104)$$

(다) 투수 특성

불포화지반에서 간극유체는 액체와 기체의 2가지 상으로 이루어져 있다. 물과 공기로 이루어져 있는 간극유체의 흐름을 해석하기 위해서 흐름율과 작용포텐셜의 상관관계를

알아야 하며 이러한 상관관계를 나타내는 값을 투수계수라 한다. 일반적으로 물의 흐름 문제에서 작용포텐셜을 ‘수두(hydraulic head)’라는 표현으로 나타낼 수 있으며, 물의 흐름을 유발시키는 원인은 수두의 변화이다. 이때 수두는 위치수두와 압력수두로 표현된다.

일반적인 지반공학 문제에서 완전 포화된 지반의 경우 유체의 흐름은 물의 흐름만으로 한정되며 이러한 물의 흐름은 Darcy의 법칙을 따른다. 하지만 불포화토의 흐름문제인 경우에는 물, 공기 그리고 흡입자의 3상 구조를 지니고 있어서 물과 공기의 흐름을 동시에 고려해야한다. 불포화토 내 물의 흐름은 간극 내 공기가 차지하는 부분으로는 일어나지 않는다. 즉 물의 흐름은 연속된 물로 이루어진 흐름통로를 통해서만 발생하며 간극 내 공기는 흡입자처럼 생각할 수 있다. 따라서 불포화지반은 포화지반과 유사한 조건으로 볼 수 있다. Childs and Collis-George (1950)는 불포화토에서도 물의 흐름이 Darcy의 법칙을 만족함을 실험을 통하여 증명하였다.

다) 불포화토의 거동 이론

(1) 자연 사면 안정 해석

국내 자연사면 파괴의 경우 파괴면의 깊이가 얕고 사면과 평행을 이루므로 간단한 평면 무한사면 해석법을 이용하여 안정해석을 수행할 수 있다. 강우에 의한 사면파괴는 지하수위 상승으로 인한 사면지반 내의 간극수압의 증가에 의해 발생하는 것으로 알려져 있으나, 기존의 연구에 의하면 강우로 인한 지하수위의 상승은 크지 않으며, 반면 강우의 침투로 인해 삼녀의 안정성을 유지하고 있던 지표면에서의 음의 간극수압의 소멸로 인한 강도의 감소가 얕은 사면파괴의 주요 원인인 것으로 알려져 있다 (Fredlund 등, 1995, Ng 등, 1998)

(가) 포화대가 존재하지 않는 경우

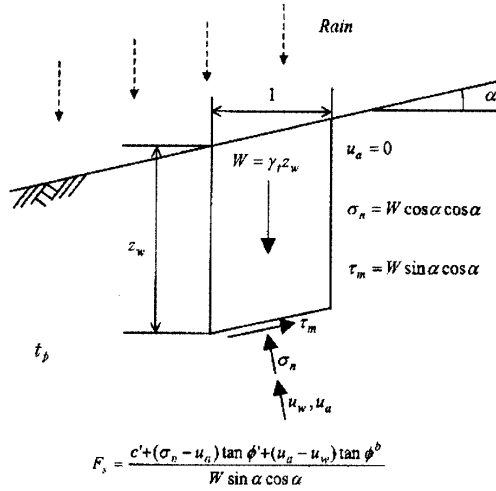


그림 5.20 불포화토의 무한사면 해석

그림 5.20과 같이 경사가 α 인 반무한 사면에서 가상의 파괴면이 사면과 평행하다고 가정하면 깊이 z_w 에서의 안전율은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F_s = \frac{c_e + (\sigma_n - u_a) \tan \phi'}{W \sin \alpha \cdot \cos \alpha} \quad (5.105)$$

여기서, $W(=\gamma z_w)$ 는 단위 폭을 가진 절편의 무게, $(\sigma_n - u_a)$ 는 전단면에서 순수직응력, c_e 는 불포화 지반의 유효점착력으로 Fredlund 등(1978)에 의해 제안된 전단강도식을 사용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_e = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (5.106)$$

(나) 포화대가 존재하는 경우

포화대가 존재하는 경우 강우에 의해 발생하는 침투로 인한 지하수위 상승이 산사태의 원인이 되며, 따라서 산 사면에서의 지하수위를 예측하는 것이 산사태 발생 위험도를 추정하는 중요한 요소이다.

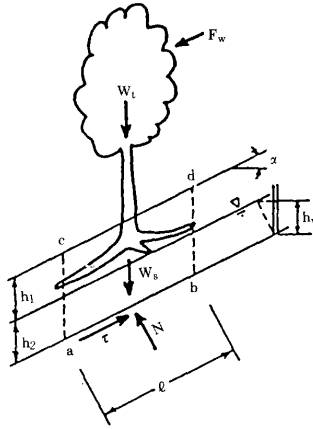


그림 5.21 포화대가 존재할 경우 무한사면안정 해석

$$F_s = \frac{c' + [(W_s + W_t) \frac{\cos \alpha}{l} - u] \tan \phi'}{(W_s + W_t) \sin \alpha} \quad (5.107)$$

(2) 자연 사면 침투 이론

Darcy 의 법칙과 연속방정식으로부터 일차원 연직흐름에 대한 지배방정식은 다음과 같이 얻을 수 있다(Richards, 1931)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (5.108)$$

여기서, θ 는 체적함수량, h 는 물의 압력수두, K 는 투수계수이다.

자연사면에 적용 가능한 침투 모델은 “제2절 이론연구”의 Green-Ampt model, Chu model, Mein-Larson model 등을 따른다.

4) 결론

자연 사면의 거동을 분석하기 위해서는 불포화토의 특성을 반영하여야 하며 국내 자연사면 파괴의 대부분은 얇은 사면 파괴이므로 무한사면안정해석법을 통하여 간편히 해석할 수 있다. 하지만 기존 연구들에서 제시된 이론들은 단일 사면에 대한 것이므로 광역적 산사태 평가를 위해서는 새로운 해석 방법이 필요하다.

나. 자연사면 함수, 역학특성 분석

1) 목적

자연사면의 불포화 지반은 흙 입자와 물-공기 사이의 모세관 현상 등의 작용으로 인하여 포화토와는 매우 다른 거동특성을 나타낸다. 이에 본 연구의 목적은 불포화 상태로 존재하는 자연사면의 안정을 규명하기 위해 반드시 고려해야 하는 지반의 고유 특성인 함수특성곡선과 강도특성을 분석하기 위한 시험을 실시하고자 한다.

2) 재료 및 실험방법

가) 재료

시험에 사용된 시료는 경기도 장흥에서 채취한 시료로 통일분류법상 SC에 해당되며 #200 통과량이 50%이하이며, 저소성의 사질토 성분이 함유된 흙이다. 시료에 대한 물리적 성질은 표 5.8과 같다.

표 5.8 시료의 물리적인 특성

Samples	LL (%)	PI (%)	G_s	Grain size distribution(%)				γ_d (tf/m ³)	e	USCS
				4.76 m/m	2.0 m/m	0.42 m/m	0.074 m/m			
A	42.92	12.95	2.747	99.10	89.93	53.13	13.75	1.516	0.802	SC
B	32.67	10.06	2.689	93.23	80.04	48.89	19.70	1.296	1.075	SC
C	32.33	10.11	2.547	96.57	91.44	56.47	20.03	1.297	0.962	SC
D	43	8.6	2.831	99.32	88.80	54.68	23.85	1.496	0.884	SC
E	30.54	10.40	2.659	97.70	76.58	48.32	13.54	1.575	0.696	SC

나) 실험방법

(1) 공시체 제작

(가) 흙-수분 특성곡선

공시체의 규격을 크게 하는 것이 다른 인자에 의한 영향을 최소화시킬 수 있지만, 공시체가 너무 크면 흡인력의 측정 및 평형상태에 도달하는데 요하는 시간이 오래 걸리게 된다. 평형도달시간이 너무 길게 되면 시험조건 및 상태가 달라질 가능성이 크다. 따라서 본 연구에서는 흡인력의 측정 및 평형도달시간을 최소화하기 위하여 불교란 시료를 직경 5cm, 높이 1cm의 황동제 몰드에 넣어 공시체를 제작하였다.

(나) 진단강도

포화상태의 경우는 불교란 시료를 트리밍하여 공시체를 제작한 후, 배압을 통해 공시체의 포화단계를 진행하였다. 그리고, 불포화상태의 경우는 흡-수분 특성곡선(SWCC)에서 구한 흡인력에 대한 값에 나타난 함수비를 바탕으로 하여 몰드(H=70mm, D=35mm)에 시료를 3층 다짐으로 공시체를 제작한 후, 축변환기법을 적용하여 공기압과 하부간극수압을 통해 요구되는 실험조건으로 진단을 실시하였다.

(2) 실험방법

(가) 흡-수분 특성곡선

본 연구는 Pressure Plate Apparatus를 개량하여 사용하였다. 이 기구는 상부에서 가해지는 공기압을 변화시켜 흡인력을 조절하도록 고안되었으며, 한 단계의 실험이 끝나면 Plate를 열어 시료의 무게를 측정하여 함수비와 흡인력의 관계를 도출하도록 되었다. 그러나, 감압하여 상부의 Plate를 제거하는 동안 ceramic disk의 수분이 흡 속으로 유입되는 단점을 가지고 있다. 때문에 많은 연구자들이 그 결과를 그대로 수용하여 흡-수분 특성곡선을 유도하였기 그 결과를 보완하는 과정에 상당한 오차를 보이는 경우가 있었다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 단점과 오차를 보완하기 위하여 Tempe pressure cell을 개조하여 황동제 프레임에 세라믹 디스크를 부착하고 하부로 유출되는 수량을 측정할 수 있도록 뷰렛을 연결하여 시험기구를 제작하여 사용하였다. 본 기구의 가장 큰 장점은 Plate 상부를 열지 않고도 연속적으로 흡인력의 변화에 따른 수분의 이동량을 측정할 수 있는 것이며, 감압에 따른 디스크의 수분이 흡 속으로 유입되는 단점을 보완한 것이다. 또한, 고압하에서도 아주 미소한 흡인력의 변화에도 쉽게 수분의 이동과 유출량을 측정할 수 있도록 고안된 것이다. 시험은 공시체를 제작한 후, 셀의 상부에 있는 세라믹 디스크와 잘 접촉되도록 세심한 주의를 기울여 설치한다. 이 때 하부의 측정 셀은 사전에 내부에 공기가 없도록 물로 충전시킨다. 셀과 공시체의 접촉을 확인한 후, 튜브를 통하여 하부로부터 물을 공급하면서 포화시킨다. 이 때 흡의 체적과 함수비는 계산된 결과를 바탕으로 함수비의 변화를 고려하여 공급될 수량을 사전에 계측하여 정한다. 뷰렛의 눈금을 통하여 공급된 수량이 충분히 포화된 것으로 나타나면 시험을 시작한다. 정해진 흡인력이 되도록 상부에서 공기압을 조절하면서 뷰렛의 눈금변화를 측정한다. 본 시험에서는 사용된 간극 공기압의 범위는 0.1kPa ~ 1,000kPa이며, 약 10단계로 공기압을 달리하여 시험하였다.

(나) 전단강도

불포화토의 전단강도 실험을 위해 일반 삼축시험에 사용되는 삼축셀을 개량하였다. 시료에 흡인력을 재현시키기 위하여 공기압과 하부 간극수압을 시료의 상단, 하단으로 가하였으며, 물을 이동시키고 공기의 이동을 제한하기 위하여 시료의 하단에 1500kpa의 공기함입저항치를 가지는 세라믹 디스크를 사용하였다. 불포화토에 대한 삼축시험은 내부에서 발생하는 간극수압의 완전한 소산을 위해 매우 느린 변형률 속도를 수행되어야 하고, 각 흡인력에서 평형을 이루는데 필요한 시간이 매우 길어 시간소모가 크다. 본 연구에서는 대상시료에 대한 적절한 변형률 속도를 Ho와 Fredlund(1982) 등이 제안한 변형률 속도를 기준으로 0.004mm/min의 변형률 속도를 채택하여 실험을 수행하였다.

3) 결과 및 고찰

가) 흙-수분 특성곡선

선정된 5종류의 시료에 대하여 개조된 Pressure Plate Apparatus를 사용하여 약10단계의 공기압을 달리하여 측정된 수분의 이동량을 바탕으로 각 시료의 함수비, 포화도 및 체적 함수비를 분석하여 흙-수분 특성곡선을 도출하고 이들의 특성을 고찰하였다.

(1) 흡인력에 따른 함수비의 변화

선정된 5가지 시료의 흡인력에 따른 함수비를 도시하면 그림 5.22과 같다. 초기의 포화상태의 함수비는 흙의 종류에 따라 많은 차이를 보이나 건조과정을 통하여 흙 속의 수분이 감소됨에 따라 잔류 함수비는 흙의 종류에 관계없이 거의 같은 값을 보이는 것을 알 수 있다.

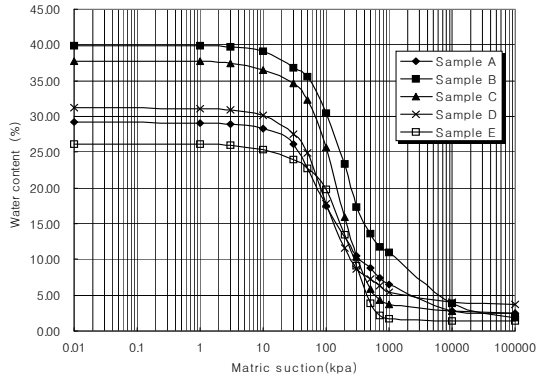


그림 5.22 함수비와 흡인력

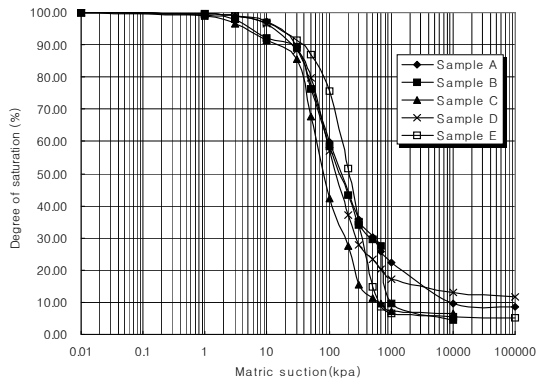


그림 5.23 포화도와 흡인력

(2) 흡인력에 따른 포화도의 변화

함수비는 흙의 수분상태를 무게를 중심으로 표시하기 때문에 흙의 수분중량을 나타낸다. 그러나 흙 속에 함유되는 수분은 흙의 간극에도 관계가 있으므로 이러한 영향을 나타내기 위하여 흙의 수분상태를 부피와 관련시켜 포화도의 변화를 도시하면 다음과 같다.

선정된 5가지 시료의 흡인력에 따른 포화도를 도시하면 그림 5.23과 같다. 그림에서 보듯이 시료가 포화상태에서 건조 상태로 수분이 감소함에 따라 포화도가 급격하게 달라지는 것을 볼 수 있다. 특히, 흡인력이 증가함에 따라 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

(3) 흡인력에 따른 체적함수비의 변화

함수비는 흙의 수분상태를 무게를 중심으로 표시하고, 포화도는 부피개념으로 나타내기 때문에 흙 속에 함유되는 수분 상태를 정확하게 나타내기 위해서는 이러한 양자의 관계를 전부 포함하여야 할 것이다. 따라서 흙의 수분상태를 무게와 부피의 개념을 동시에 고려하여 나타내기 위하여 체적함수비로 도시하면 다음과 같다. 선정된 5가지 시료의 흡인력에 따른 체적함수비를 도시하면 그림 5.24와 같다. 함수비로 나타내면 흡인력이 큰 경우에는 구분이 명확하지 못하고, 포화도로 표시하면 초반부의 차이를 구분하기 어려운 단점을 가지고 있다. 그러나 체적함수비로 나타내면 이러한 단점을 보완하여 흡인력의 변화에 따른 수분상태를 보다 명확하게 구분할 수 있는 장점이 있다.

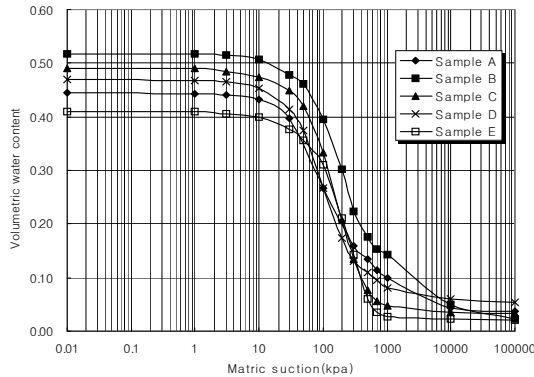


그림 5.24 체적함수비와 흡인력

(4) 제안된 흙-수분 특성곡선식과의 비교

(가) Brooks and Corey(1964)의 계수 비교

새로운 특성 방정식을 유도하기 위하여 시험결과를 바탕으로 제안된 특성 방정식을 검토하여 문제점과 장단점을 분석하였다. 표 5.9는 Brooks and Corey의 방정식에 사용되는 각 상수를 도출하여 정리한 것이다. 표 5.9에서 알 수 있듯이 공극비의 변화에 따라 각 상수는 서로 다른 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

표 5.9 Brooks's equation에서의 계수

Samples	Sr	λ	$(u_a - u_w)_b$
A	8.59	1.20	15.80
B	4.48	1.34	21.74
C	6.70	1.42	26.32
D	11.66	1.28	20.50
E	5.14	1.48	30.08

(나) Fredlund and Xing(1994)의 계수 비교

체적함수비를 추정하기 위해서는 Fredlund 등이 제안한 방정식을 바탕으로 실험치와 비교하여 각 계수를 도출하여 요약하였다. 표 5.10은 각 시료의 실험 결과를 바탕으로 도출된 각 계수를 정리한 것이다.

표 5.10 Fredlund and Xing equation에서의 계수

Samples	a	b	c	hr
A	15.80	1.20	2.51	1300
B	21.74	1.34	1.79	3000
C	26.32	1.42	2.53	1000
D	20.50	1.28	3.64	1500
E	30.08	1.48	1.35	870

나) 전단강도

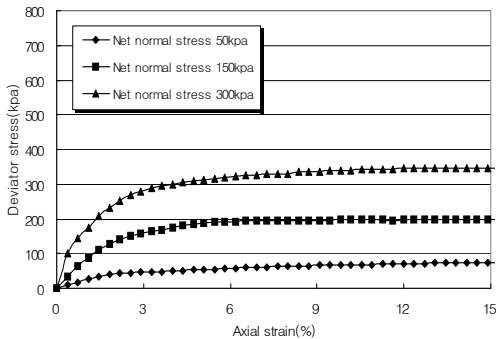
불포화토의 전단거동을 밝히기 위해 구속압력을 50kpa, 150kpa, 300kpa으로 각각 달리하고 각각의 구속압력에 따라 흡인력을 0kpa, 10kpa, 50kpa, 100kpa로 달리하여 삼축 시험을 수행하였다.

(1) 축차응력

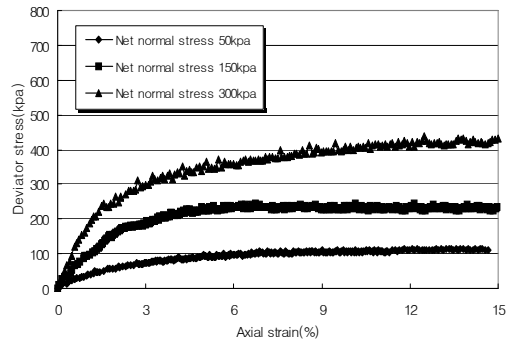
(가) 흡인력에 따른 축차응력의 변화

그림 5.25는 시료A를 순구속압을 달리한 경우 흡인력의 변화에 따른 축차응력을 도시한 것이다. 그림에서 따르면 흡인력에 따라 축차응력은 증가하는 경향을 보이고 있다. 흡인력이 증가할수록 피크시 강도는 더 높은 변형률에서 나타나고 있음을 알 수 있다.

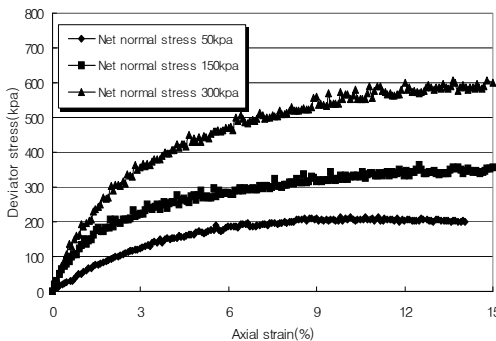
다. 이것은 동일한 흡인력을 가해도 순구속압이 증가하면 흡인력의 영향이 감소하는 것을 나타내며, 시료에 흡인력을 가하면 축차응력-변형률 관계에서 파괴는 점차 작은 변형에서 발생한다고 판단된다.



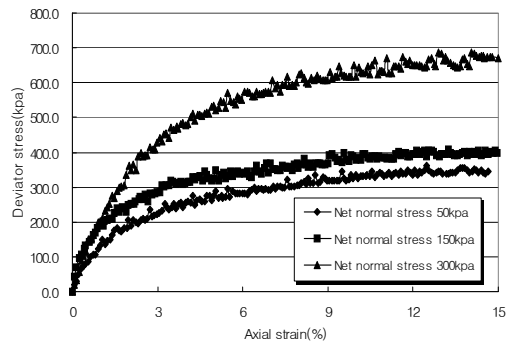
(a) 흡인력 0kpa



(b) 흡인력 10kpa



(c) 흡인력 50kpa



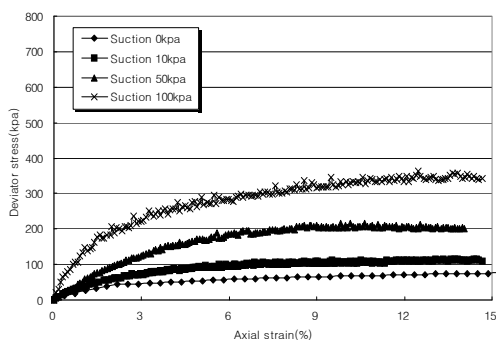
(d) 흡인력 100kpa

그림 5.25 흡인력 변화에 따른 각 구속압력에서의 변형률 대 축차응력(Sample A)

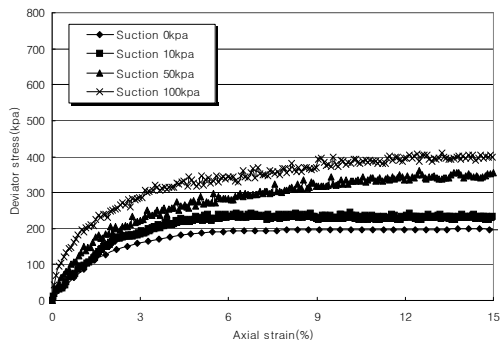
(나) 순구속압에 따른 축차응력의 변화

시료A인 경우의 순구속압을 50, 150, 300kpa에 따라 흡인력별로 축차응력을 비교해 본 결과를 그림 5.26에 도시하였다. 순구속압이 50kpa인 경우 흡인력이 10kpa에서 100kpa로 증가할 때의 축차응력 증가량이 순구속압이 150kpa인 경우보다 더 큼을 알 수 있다. 따라서, 흡인력에 따른 축차응력의 변화는 순구속압이 증가하면서 축차응력도 증가됨을 알 수 있었으며, 축차응력의 증가량은 순구속압보다 흡인력의 변화에 더 많은

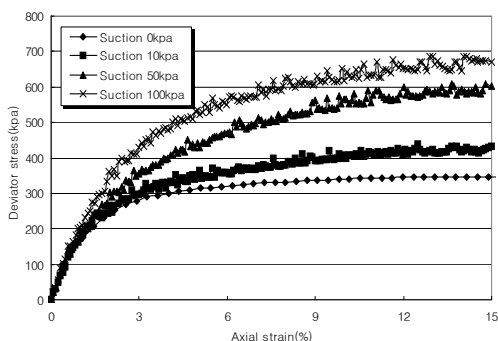
영향을 받고 있음을 알 수 있다. Fredlund등(1979)에 의하면 흡인력에 따른 축차응력의 변화는 순구속압이 증가하면서 축차응력도 함께 증가된다고 발표하였고, 축차응력 증가량은 순구속압보다 흡인력의 변화에 더 많은 영향을 받는다고 하였다.



(a) 순 구속압 50kpa



(b) 순 구속압 150kpa

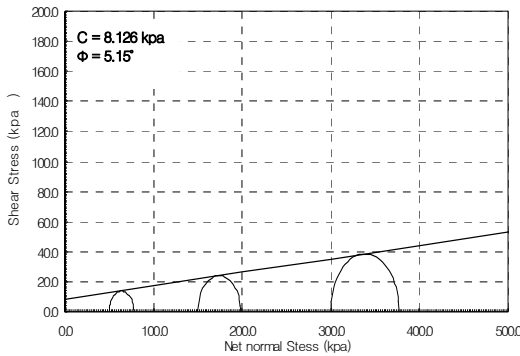


(c) 순 구속압 300kpa

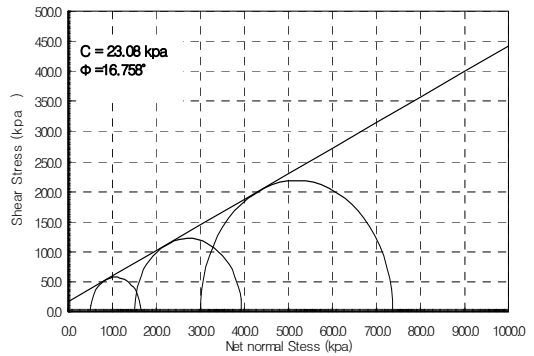
그림 5.26 순구속압 변화에 따른 각 흡인력에서의 변형률 대 축차응력(Sample A)

(2) 불포화토의 파괴포락선 및 강도정수의 도출

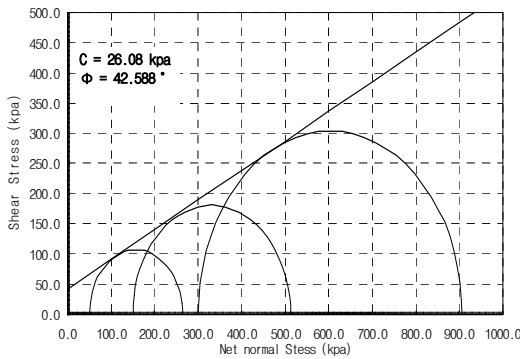
그림 5.27은 시료 A에 대하여 흡인력이 0kpa, 10kpa, 50kpa, 100kpa일 때의 파괴포락선을 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 시료 A의 경우 흡인력이 0kpa인 경우 점착력이 8.126kpa, 내부마찰각이 5.15°, 10kpa인 경우는 점착력이 16.718kpa, 내부마찰각이 23.08°, 50kpa인 경우에는 점착력이 42.588kpa, 내부마찰각이 26.08°, 100kpa인 경우에는 점착력이 65.557kpa, 내부마찰각이 26.27°로 나타났다.



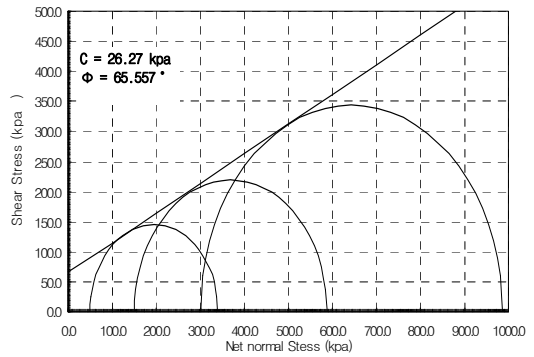
(a) 흡인력 0kpa



(b) 흡인력 10kpa



(c) 흡인력 50kpa



(d) 흡인력 100kpa

그림 5.27 흡인력 변화에 따른 파괴포락선(Sample A)

(3) 강도정수의 분석

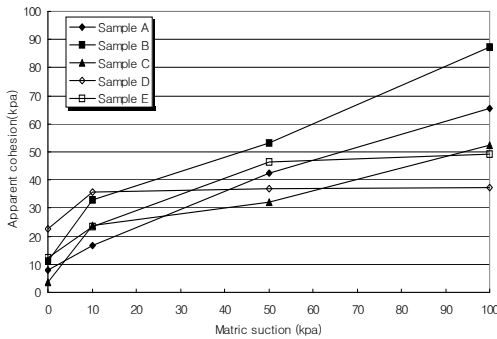
그림 5.28은 선정된 시료 5가지의 흡인력에 따른 점착력과 내부 마찰각의 변화를 도시한 것이다. 흡인력이 증가할수록 점착력과 내부마찰각이 증가함을 볼 수 있다.

(가) 불포화토 점착력의 변화

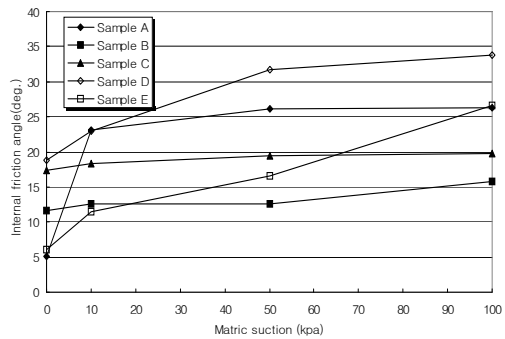
점착력의 경우 모든 시료에서 흡인력이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하였다. 흡인력이 증가함에 따라 강도정수가 증가하는 이유는 흙이 건조과정에 의하여 흡인력이 달라지면 점착력을 가지게 되어 강도가 증가한다는 것을 의미한다.

(나) 불포화토의 내부마찰각의 변화

내부마찰각의 경우는 흡인력이 증가함에 비선형적으로 증가하였다. 이는 흡인력이 증가하면 물을 중심으로 토립자가 결합하여 조립토처럼 거동하게 되어 내부마찰각도 증가되는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Wheeler (1989)의 해성점토에 대한 연구결과와 Krahn등(1989)의 Notch Hill 실트에 대한 연구결과에서도 비슷하게 나타났다.



(a) 점착력

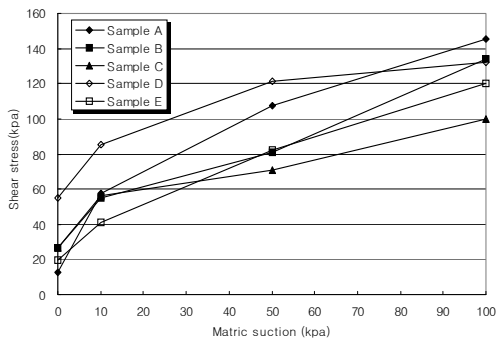


(b) 내부 마찰각

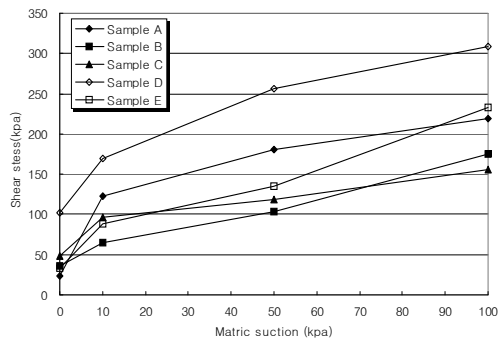
그림 5.28 전단강도 변수와 흡인력과의 관계

(4) 불포화토의 강도특성

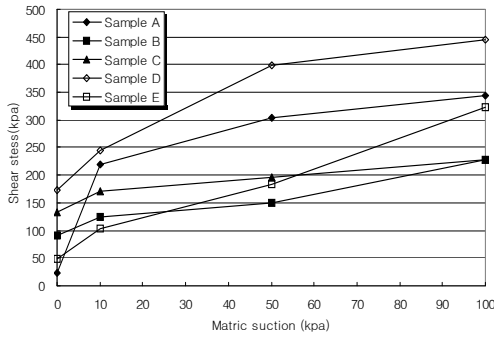
그림 5.29은 순구속압이 50kpa, 150kpa, 300kpa인 상태에서 흡인력에 대한 전단응력을 도시한 것이다. A시료의 경우 순구속압이 50kpa일 때의 ϕ^b 가 8.05°, 150kpa일 때의 ϕ^b 가 18.91°, 300kpa일 때의 ϕ^b 가 31.55°로 나타났다. 이러한 흡인력에 따른 전단강도의 증가경향으로 불포화 영역에 대한 강도정수 적용시 흡인력의 고려가 필요할 것으로 판단된다. 전단강도는 흡인력이 증가함에 따라 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 흡인력에 따른 전단강도가 증가하는 변곡점의 흡인력은 흙-수분 특성곡선에서의 공기함입저항치(Air entry value)의 근처에서 나타났다. 한편 Fredlund 등(1978)은 직접 전단시험의 결과로부터 선형적인 전단강도식을 주장한 바 있지만, 위의 실험결과를 보면 전단강도는 흡인력에 따라 선형적으로 증가하는 것이 아니라 비선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 비선형적인 증가를 보이는 경향은 Escario와 Saez(1986)의 직접전단 시험의 결과에서도 나타났다.



(a) 순구속압 50kpa



(b) 순구속압 150kpa

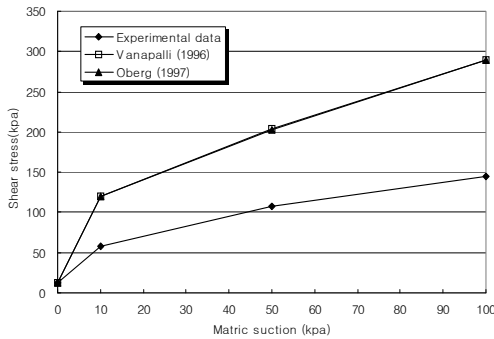


(c) 순구속압 300kpa

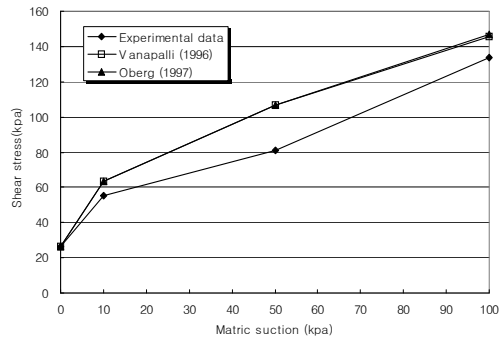
그림 5.29 순구속압 변화에 따른 흡인력에 대한 전단응력

(5) 흡-수분 특성곡선을 이용한 전단강도 도출

흡-수분 특성곡선에서 도출된 데이터를 가지고 Vanapalli(1996), Oberg and Sallfors(1997)의 제안식을 이용하여 전단강도 도출하고 실험에 의한 데이터와 비교 검토하였다. 그림 5.30은 순구속압이 50kpa인 경우에 시료A와 시료B에 대하여 Vanapalli(1996), Oberg and Sallfors(1997)의 예측식과 비교 검토하였다. 그림에서 알 수 있듯이 실험에서 얻어진 값과 예측값은 상당한 차이를 보이고 있었다. 이는 우리나라에 존재하는 흙에 Vanapalli(1996), Oberg and Sallfors 등(1997)에 의한 전단강도 예측식을 적용하기는 힘들것으로 판단되며 차후 우리나라의 기후와 환경조건에 맞는 적절한 예측식이 필요할 것으로 판단된다.



(a) 순구속압 50kpa (Sample A)



(b) 순구속압 50kpa (Sample B)

그림 5.30 이론값과 실측값의 비교

다. 결론

① 선정된 시료 5가지에 대하여 개조된 Pressure Plate Apparatus에 적용하여 약 10단계의 공기압을 공급하여 수분의 이동량을 측정하였다. 측정된 결과를 바탕으로 각 시료의 함수비, 포화도 및 체적 함수비를 분석하여 흡-수분 특성곡선을 도출하고 이들의 특성을 요약하면 다음과 같다.

- 흡인력과 함수비로 도시된 특성곡선에서 흡인력의 변화에 따른 함수비의 특성은 낮은 흡인력에서는 명확하게 구분되었다.
- 흡인력에 따른 포화도 특성은 초기에는 구분이 거의 되지 않지만 건조과정이 진행되면서 그 특성을 나타내게 되어 건조된 시료의 흡-수분 특성곡선을 파악하는데 적용할 수 있다.
- 흡인력에 따른 특성곡선을 체적 함수비로 나타내면 초기 포화부분뿐만 아니라 건조과정이 진행된 후에도 구분이 명확하게 나타났다.

② 불포화토의 전단거동을 밝히기 위해 구속압력을 50kpa, 150kpa, 300kpa로 각각 달리하고 각각의 구속압력에 따라 흡인력을 10, 50, 100kpa로 달리하여 삼축시험을 수행한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 순구속압이 일정할 경우에는 흡인력이 증가할수록 피크시 강도는 더 높은 변형률에서 나타났고, 이것은 동일한 흡인력을 가해도 순구속압이 증가하면 흡인력의 영향이 감소하는 것을 나타내며, 시료에 흡인력을 가하면 축차응력-변형률 관계에서 파괴는 점차 작은 변형에서 발생한다고 판단된다.
- 불포화토의 강도특성에 영향을 주는 인자로는 순구속압과 흡인력인 것으로 나타났으며, 전단강도는 흡인력의 증가에 따라 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.
- 흡인력에 따른 축차응력의 변화는 순구속압이 증가하면서 축차응력도 증가됨을 알 수 있었으며, 축차응력의 증가량은 순구속압보다 흡인력의 변화에 더 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.
- 순구속압과 흡인력이 일정할 경우에는 다짐률이 감소함에 따라 피크시 강도는 더 높은 변형률에서 나타났고, 이것은 동일한 흡인력을 가해도 다짐률이 감소하면 흡인력의 영향이 증가하는 것을 나타내며, 시료의 간극비가 증가함에 따라 축차응력-변형률 관계에서 파괴는 점차 큰 변형에서 발생한다고 판단된다.
- 불포화토의 전단강도는 흡인력에 따라 증가하며, 전단강도는 흡인력의 증가에 따라 비선형 관계에 있음을 알 수 있었고, 불포화상태에서 전단강도정수는 흡인력에 따라 내부마찰각과 점착력이 증가하는 경향을 보였고 흡인력이 불포화토의 강도특성이 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있었다.

3. 사면 침투특성인자 영향 분석

가. 목적

침투특성이 사면안정에 미치는 영향을 보다 정확하게 규명하기 위하여 Green and Ampt 모델을 기반으로 한 Chu 모델에 수분재분포를 고려하여 수정된 침투모델을 제안하였다.

나. 자연사면에 대한 침투, 투수특성 조사

1) 기존 모델의 문제점 및 수정된 침투모델의 제안

Green-Ampt 모델을 수정한 Chu 모델은 Ponding이 발생하지 않을 경우 즉, $i < f$ 일 때 Chu 모델에서 강우는 모두 지하로 침투하며 piston flow를 형성한다고 가정하였다. 하지만 이 경우 상부층의 포화영역에서 하부층의 불포화영역으로 수분이 이동하는 수분재분포 현상이 발생하게 되며 더 이상 침투는 piston flow를 형성하지 않는다. 즉,

ponding이 발생하지 않을 경우 포화영역이 사라지게 되어 Chu 모델의 개념은 유효하지 않게 되므로 포화깊이를 예측하는 것은 무의미하며 심도별 함수비를 예측하여 다음 강우강도에 대한 포화깊이 산정 시 초기함수비로 고려하여야 한다. 이러한 현상을 고려하여 다음과 같이 수정된 침투모델을 제안하였다.

① $i < f$ 일 경우 (non-ponding case)

$z = 0$: 수분재분포로 인해 포화영역이 사라지므로 포화깊이는 0.

$\theta_o \rightarrow \theta_o'$: θ_o' 는 수분재분포에서 예측된 함수비이며 ponding case에서의 초기함수비

② $i \geq f$ 일 경우 (surface ponding case)

$$z = \frac{F'_z - F'_{Z_{n-1}}}{\Delta\theta'_n} + Z_{n-1}' \quad (5.109)$$

여기서, $\Delta\theta'$ 는 수분재분포에서 예측된 초기함수비 (θ_o')를 이용하여 산정된 값이다.

2) 습윤전선에서의 모관흡수력

Morel-Seytoux 등(1996)은 van Genuchten(1980)의 함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)식의 맞춤변수로부터 습윤전선에서의 모관흡수력을 산정할 수 있는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\psi_{mf} = \frac{0.046m + 2.07m^2 + 19.5m^3}{\alpha(1 + 4.7m + 16m^2)} \quad (5.110)$$

여기서, α, m : van Genuchten 함수특성곡선식의 맞춤변수

다. 현장 모니터링에 의한 침투특성 조사

1) 연구지역

연구 사면은 경기도 양주시 장흥면 돌고개에 위치하며 지질은 선캄브리아기 호상편마암이다. 사면의 경사는 평균 30° 정도이며 길이는 약 50m이다. 시추조사 결과 사면의 상단과 중단은 심도 1m까지 잔적토층, 1~4.5m까지는 풍화토층, 그 아래에는 풍화암이 존재하였으며, 하단의 경우 심도 2.5m까지 잔적토층, 2.5~7.3m까지는 풍화토층, 그 아래에는 풍화암이 존재하였다.

2) 연구방법

본 연구에 사용된 강우자료는 의정부 기상관측소의 시우량 자료이다. 의정부 관측소는 TM좌표로 $x=204092.36$, $y=471265.44$ 이며 대상사면과 직선거리로 약 5km에 위치한다. 또한 제안된 모델을 검증하기 위해 심도별 체적함수비를 계측하여 강우에 따른 함수비 변화를 모니터링 하였으며 보델 변수를 산정하기 위해 불포화 함수특성곡선 시험 및 투수시험, 현장밀도시험을 수행하였다. 그림 5.31에 연구 과정 및 방법을 도시하였다.

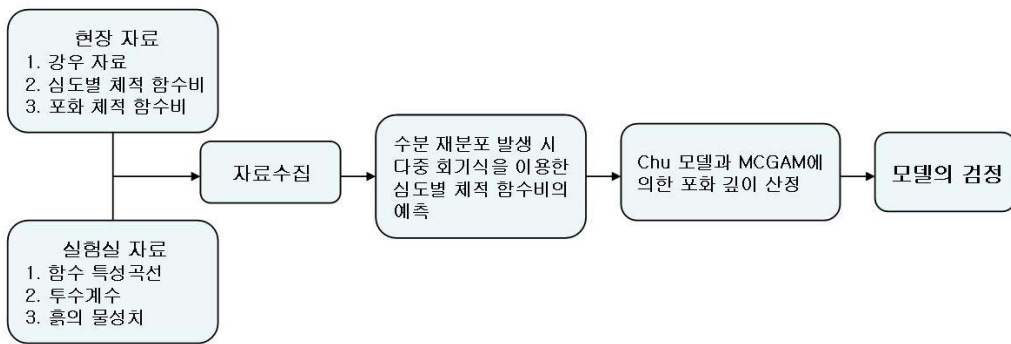


그림 5.31 현장 모니터링에 의한 침투특성 조사 흐름도

가) 현장 체적함수비 계측

체적함수비 센서는 Decagon사의 ECH_2O-10 을 이용하였으며 사면의 하단에 30cm, 90cm, 120cm에 매설하였다. 그림 5.32에 센서의 배치도, 시추조사 및 샘플링 위치를 나타내었다.

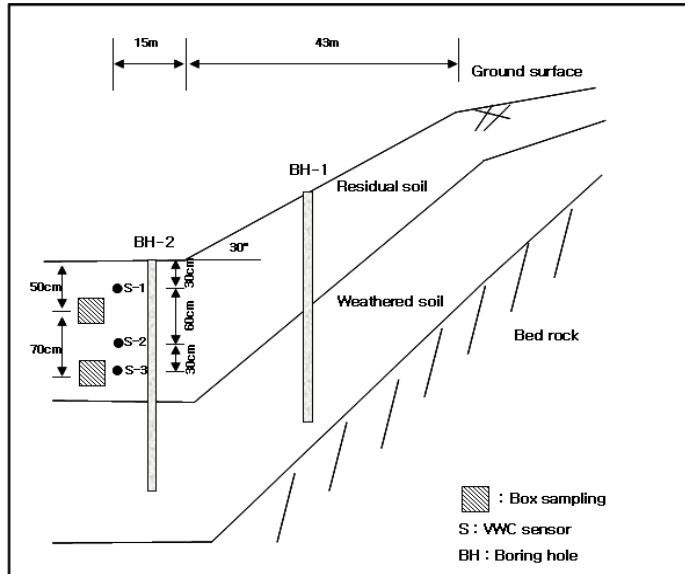


그림 5.32 대상 지역 계측기 매설 모식도

나) 모델변수산정

침투 모델변수를 산정하기 위해 일련의 시험을 수행하였다. 포화체적함수비를 산정하기 위해 현장밀도시험을 수행하였으며, 포화투수계수를 산정하기 위해 현장밀도에 맞게 시료를 성형 후 정수두투수시험을 수행하였다. 또한 습윤전선에서의 모관흡수력을 산정하기 위해 함수특성시험을 실시하였다.

3) 수분재분포 과정에서의 함수비 예측

해석모델의 장점인 간편성을 최대한 유지하기 위해 수분재분포 과정에서의 함수비는 다중선형회귀법을 사용하여 예측하였다. 해석프로그램은 SPSS12.0을 사용하였으며 해석방법으로는 단계입력방식을 선택하였다.

입력된 독립변수는 강우경과시간, 강우강도, 누적강우량, 강우 초기의 체적함수비, 포화투수계수, 습윤전선에서의 모관흡수력이며 종속변수는 각 시간에서 계측된 함수비이다. 깊이에 따라 독립변수의 영향이 시간에 따라 다르므로 보다 정확한 예측을 위해 심도별로 산정하였다. 해석결과 기본적인 회귀방정식은 다음과 같으며 표 5.11에 각 변수의 계수를 정리하였다. 식(5.111)에서 보듯이 포화투수계수와 습윤전선에서의 모관흡수력은 심도별로 동일한 값을 가지므로 회귀식에서 제거되었다.

표 5.11 다중회귀식에 의한 매개변수

Depth (cm)	α	β	γ	δ	$const$	R^2
30	0.067	0.272	-	-	30.181	0.889
90	0.035	-0.053	0.855	-0.047	4.779	0.868
120	0.015	-0.030	0.620	-	13.157	0.646

$$\theta = \alpha R_c + \beta R_i + \gamma \theta_o + \delta t + const. \quad (5.1116)$$

여기서, R_c : 누적강우량 (mm), R_i : 강우강도 (mm/h), θ_o : 초기함수비 (%), t : 경과시간 (h)

심도별 최대오차범위는 30cm의 경우 $\pm 1.99\%$, 90cm의 경우 $\pm 1.68\%$ 이며, 120cm에서는 $\pm 0.88\%$ 였다. 오차가 $\pm 1\%$ 이상인 예측값은 30cm에서 총 표본개수의 16.67%, 90cm에서는 22.22%였으며, 120cm의 경우 0%였다. 따라서 산정된 회귀식에 의한 수분 재분포 과정에서의 함수비 예측이 가능할 것으로 판단된다.

4) 침투 해석 및 수정된 침투모델의 검증

가) 해석조건

본 해석에 사용된 강우는 2005년 9월 13일 강우로 연구 기간에 발생된 강우 중 가장 큰 강우강도를 가진다. 자연사면의 경우 식생에 의해 차단손실이 발생하므로 Kim(1993)이 제안한 차단손실을 산정공식을 이용하여 강우강도에 따라 보정을 하였다. Chu 모델의 경우 강우와 강우 사이의 무강우에 대해 고려할 수 없으므로 9월 13일 12시 - 18시 사이의 연속강우에 대해 해석을 실시하였다. 다음은 Kim(1993)이 제안한 강우차단 손실을 산정공식이다.

$$I_p = 35.84 R_t^{-0.6} \quad (5.112)$$

여기서, I_p : 강우차단손실을 (%), R_t : 강우강도 (mm/h)

대상지역의 지반조건 및 함수특성곡선 시험으로부터 산정한 van Genuchten(1980)의

맞춤변수와 습윤전선에서의 모관흡수력 및 침투해석을 위한 초기조건을 표 5.12에 나타내었다.

표 5.12 침투해석 초기조건

Depth (cm)	θ_s (%)	θ_s (%)	ψ_{mf} (cm)	K_s (cm/h)
0 - 60	31.08	42.12	83.25	0.69
60 - 100	32.70	42.12	83.25	0.69
100 - 140	34.04	39.36	122.12	0.12

여기서 θ_o : 초기함수비, θ_s : 포화함수비, ψ_{mf} : 습윤전선에서의 모관흡수력
 K_s : 포화투수계수

나) 침투해석 및 수정된 침투모델의 검증

수정된 침투모델을 검증하기 위해 전술한 해석조건을 바탕으로 Chu 모델과 수정된 침투모델을 이용하여 침투해석을 실시하였다.

(1) Chu Model

표 5.13에 Chu 모델을 이용한 침투해석 과정을 나타내었다. 각 시간 간격에서 강우 강도는 동일하다고 가정하며 지표수막 여부를 판정하게 된다. 지표수막이 발생하지 않으면 강우는 모두 지반으로 침투되며 지표수막이 발생할 경우 발생시간 t_p 를 산정한 후 침투해석을 수행하게 된다.

표 5.13 Chu 모델

Elapsed time (hr)	F (cm)	z (cm)	f (cm/hr)	Ponding status	F_p (cm)	t_p (hr)	t_s (hr)
1	0.24	2.21	26.63	non-ponding			
2	1.06	9.59	6.68	non-ponding			
3.00	3.92	35.51	2.56	ponding			
2.65	2.92	26.47	2.86		2.92	2.65	0.56
3	3.82	34.60	2.33	non-ponding			
4	3.97	35.99	2.27	non-ponding			
5	4.50	40.76	2.09	non-ponding			
6	5.12	46.40	1.92	non-ponding			

(2) 수정된 침투모델

표 5.14에 수정된 침투모델의 침투해석 과정을 나타내었다. 이 경우 지표수막 여부를 판정하였을 때 지표수막이 발생하지 않으면 포화깊이는 0이 되고 전술한 회귀식을 통하여 심도별 함수비를 예측하게 된다. 예측된 함수비는 다음 침투해석 시 초기함수비로 계산된다. 즉, 예측된 초기함수비에 따라 다음 강우강도에 대한 지표수막 여부를 판정하고 지표수막 조건일 경우 포화깊이를 산정하게 된다.

표 5.14 수정된 침투모델

Elapsed time (hr)	F (cm)	F' (cm)	z (cm)	f (cm/hr)	Ponding status	F_p (cm)	t_p (hr)	t_s (hr)	Prediction of θ_o' (%)		
									30cm	90cm	120cm
1	0.24	0.24	0	26.63	non-ponding				31.55	32.71	34.14
2	1.06	1.06	0	6.42	non-ponding				32.12	32.95	34.23
3.00	3.92	2.86	32.20	2.47	ponding				Saturated condition		
2.91	2.92	2.62	29.46	2.86		2.62	2.91	0.50			
3	3.91	2.85	31.82	2.68	non-ponding				33.88	33.98	34.67
4	4.06	0.15	0	31.20	non-ponding				34.23	34.16	34.76
5	4.59	0.53	0	9.16	non-ponding				34.77	34.60	34.97
6	5.21	0.62	0	7.63	non-ponding				36.13	34.70	35.01

침투해석 결과 Chu 모델의 경우 6시간 경과 후 총 침투 깊이는 46.40cm인 반면 수정된 침투모델의 경우 2~3시간에서의 강우강도에서만 포화깊이 32.84cm가 산정되었으며 그 이하의 강우강도 즉, non-ponding 조건인 강우강도에 대해서는 함수비가 예측되었다. 또한 Chu 모델의 경우 시간이 경과할수록 침투능이 계속적으로 감소하는데 비해 수정된 침투모델의 경우 수분재분포 현상으로 인해 지반의 침투능이 다시 상승하였다.

Chu 모델에 의한 해석결과와 본 연구에서 제안한 수정된 침투모델에 의한 해석결과를 계측된 체적함수비와 함께 그림 5.21에 도시하였다.

그림 5.33(a)에서 알 수 있듯이 3시간 경과 후 지표수막이 발생하였을 때 Chu 모델과 수정된 침투모델의 경우 모두 실제 계측된 값과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 그림 5.31(b)에서 계측된 함수비분포에서 보듯이 지표수막 발생하지 않을 경우 수분재분포로 인해 포화영역이 사라짐을 알 수 있다. Chu 모델의 경우 이를 고려하지 못하므로 포화깊이를 과대산정하게 되면 포화영역에서는 불포화 지반을 유지하는 음의 간극수압이 사라지게 되므로 사면의 안정성을 실측된 자료보다 낮게 평가할 것으로 판단된다. 하지만 수정된 침투모델은 수분 재분포 과정에서 회복되는 지반의 음의 간극수압을 고려할 수 있으며 해석 결과 계측된 함수비 분포와 유사하므로 이를 이용한 침투해석 및 사면안정 해석이 합리적일 것으로 판단된다.

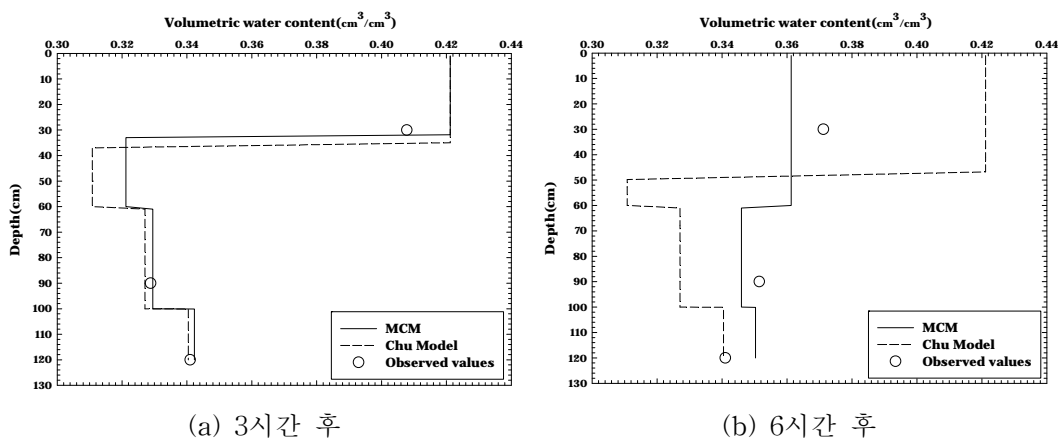


그림 5.33 수정된 침투모델의 검증

라. 결론

자연사면에서 강우침투시 포화깊이를 산정하기위해 강우침투모델인 Chu 모델을 수정하여 수정된 침투모델을 제안하였으며, 제안된 모델에 의한 해석결과와 현장 계측결과를 비교하여 적용성을 검증하였다.

- ① Non-ponding 조건에서 발생하는 수분재분포 과정에서의 함수비를 현장계측자료와 다중선형회귀법을 이용하여 예측하였으며 이를 고려하여 수정된 침투모델을 제안하였다.
- ② 침투해석결과 ponding 조건에서 수정된 침투모델과 Chu 모델이 유사한 결과를 주었으며 계측된 체적함수비 분포와도 잘 일치하였다. Non-ponding의 경우 본 연구에서 제안된 수정된 침투모델에 의해 산정된 포화깊이는 0이었으며, 예측된 함수비는 계측된 체적함수비와 잘 일치하였다. 하지만 Chu 모델은 수분의 재분포를 고려하지 않으므로 포화영역이 없음에도 포화깊이를 산정하였으며, 따라서 포화깊이를 과대 산정할 수 있으며, 포화 영역에서는 불포화 지반을 유지하는 음의 간극수압이 사라지게 되므로 Chu 모델에 의한 해석결과는 사면의 안정성을 계측된 자료에 비해 낮게 평가할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 수정된 침투모델에 의한 침투해석이 합리적일 것으로 판단된다.

4. 지형인자 영향 분석

가. 목적

지형인자가 사면안정에 미치는 영향을 분석하기 위하여 선정된 지역에 대하여 사면 굴곡을 반영하는 프랙탈 차원(Isarithm Method)을 산정한다. 산정된 프랙탈 차원과 지형을 나타내는 다른 인자들과 함께 무한사면안정해석을 통하여 산정된 안전율과의 비교를 통해 그 영향을 평가하고 GIS를 통하여 사면위험성을 도시하고자 한다.

나. 배경이론

1) Isarithm Method

Isarithm Method는 우선 일정 임계치를 기준으로 하여 임계치 이하인 이진 영상을 생성하고, 하나의 열에 대하여 자신의 화소와 그로부터 횡방향으로 step size 만큼 떨어져 있는 화소를 비교하여 서로 다르면 count를 증가시킨다. 이런 계산을 모든 열에 대하여 한 후, 마찬가지로 열과 행을 바꾸어 모든 행에 대한 열방향의 연산도 한다. 이렇게 전 영상에 대하여 계산된 count와 step size에 log 함수를 적용하여, 이 값들을 회귀분석한 후, 각 여러 임계치에 대해 구해진 프랙탈 차원 중 상관계수가 임계치 이상인 것만 취하여 그 기울기를 평균한 값을 영상 전체에 대한 프랙탈 차원으로 사용한다.

2) 무한사면안정해석모형

무한사면해석법은 활동면의 형태를 사면 표면에 평행한 직선으로 가정한 계산법으로 활동면의 길이가 활동면의 깊이에 비하여 충분히 큰 사면의 안정계산에 사용한다. 흙의 성질과 지하수위 조건은 전체 사면에 걸쳐 변하지 않는 것으로 가정한다. 그림 5.34에서 요소 ABCD를 생각하여 사면의 경사각을 β , 흙의 점착력을 c' , 내부마찰각 ϕ' , 흙의 단위중량 γ 라 하면 요소의 중량 $W = \gamma zb$, 공극수압 $u = \gamma_w h_w$, 공극수의 단위중량은 $\gamma_u = \frac{u}{\gamma_z}$ 이다. 요소에 작용하는 연직응력을 σ , 전단응력을 τ 라 하면 사면이 무한이므로 $Q_L = Q_R$ 이다. 이로부터, 무한사면의 안전율은 식(5.113)과 같다.

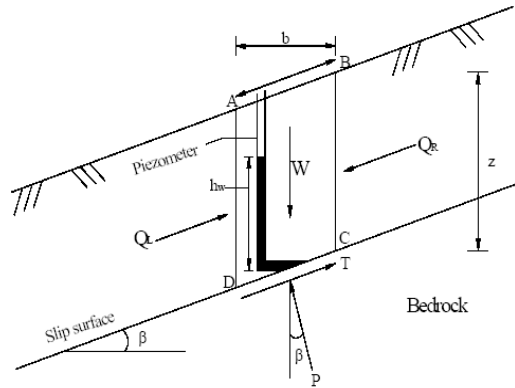


그림 5.34 무한사면 안정해석의 도식

$$F_s = \frac{s}{\tau} = \frac{c' + (\sigma - u)\tan\phi'}{\gamma z \sin\beta \cos\beta} \quad (5.113)$$

여기서, 전토층의 깊이에 대한 지하수위의 깊이의 비인 습윤지수(Wetness index, WI)를 고려하면 식(5.114)와 같다.

$$F_s = \frac{s}{\tau} = \frac{c' + [(1 - WI)\gamma_t + m\gamma_{sub}] \cdot z \cdot \cos^2\beta \phi'}{[(1 - WI)\gamma_t + m\gamma_{sat}] z \cdot \sin\beta \cos\beta} \quad (5.114)$$

다. 연구방법

1:25,000 축척의 NGIS 수치 지형도 8개(377104, 377113, 377142, 377151, 378033, 378034, 378071, 378072)를 선택하여 프랙탈 차원을 산출하였다. 지역 선택은 지형적 차이를 두기 위하여 평탄한 지역인 경기도에서 4곳, 험준한 지역인 강원도에서 4곳을 선택하였다. 프랙탈 차원산출에는 프로그램 Matlab 6.5를 이용, isarithm method를 통하여 산출하였다.

사면안전 해석에는 1차원 무한사면 사면안정해석법을 선택하였다. 사면안전을 계산을 위해 지리정보시스템 소프트웨어 ArcMap을 이용하였고 NGIS 수치지형도(377104, 377113, 377142, 377151, 378033, 378034, 378071, 378072)를 입력 자료로 이용하였다. 불규칙삼각형망 형성을 통해 사면 경사를 추출하고 식(5.114)로 안전율을 계산하였다. 자연사면 최소안전율의 기준을 절토사면 기준과 동일하게 적용하여 최소안전율은 1.1 이

상이 되어야 하는 것으로 판정하였다. 안전율 계산을 위한 토양 기본 조건은 표 5.15와 같다.

표 5.15 사면안정해석조건

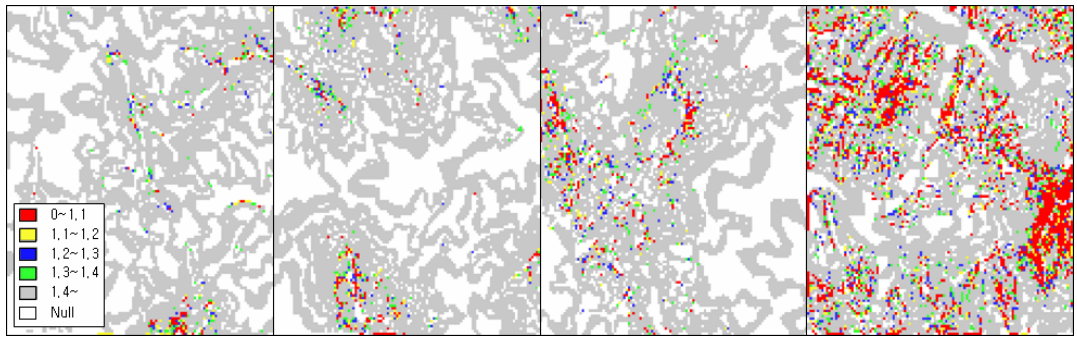
조건	값	비고
Resolution(m)	25	
Soil Depth (m)	1.5	
Wetness Index(D)	1.0D	D:Depth(m), Saturated
Cohesion(kPa)	10	
$\gamma_{sat}(kN/m^3)$	20	
Friction Angle(°)	30	

라. 결과

선정 지역의 프랙탈 차원과 안전율 해석 결과, 지형에 따라 다르게 해석되었다. 프랙탈 차원은 3.0013~3.1298의 분포를 보였으며, 산사태 위험지로 판정되는 안전율 1.1 이하인 지역의 백분율은 1.01~78.23%이었다. 각 지역에 대한 안전율 분포는 표 5.16에 정리하였으며 그림 5.35은 각 사면의 안전율 분포를 GIS상에서 나타낸 것이다.

표 5.16 각 지도에서의 안전율 분포

	A	B	C	D	E	F	G	H
~1.1	1.01%	3.26%	1.72%	16.15%	21.83%	28.10%	30.83%	78.24%
1.1~1.2	0.83%	1.46%	0.95%	4.71%	7.53%	6.32%	7.22%	7.46%
1.2~1.3	0.96%	1.90%	1.17%	5.44%	7.71%	6.39%	6.87%	4.91%
1.3~1.4	1.34%	2.21%	1.65%	5.88%	7.36%	5.92%	6.80%	3.10%
1.4~	95.85%	91.17%	94.51%	67.82%	55.58%	53.27%	48.28%	6.29%

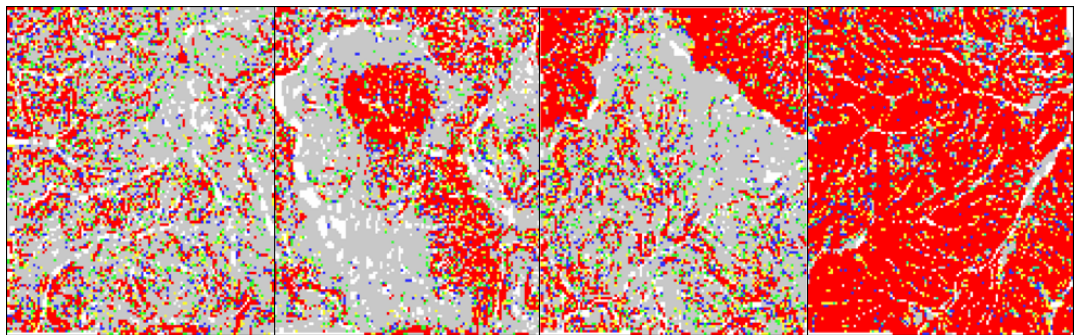


(a) A (377113)

(b) B (377142)

(c) C (377151)

(d) D (377104)



(e) E (378072)

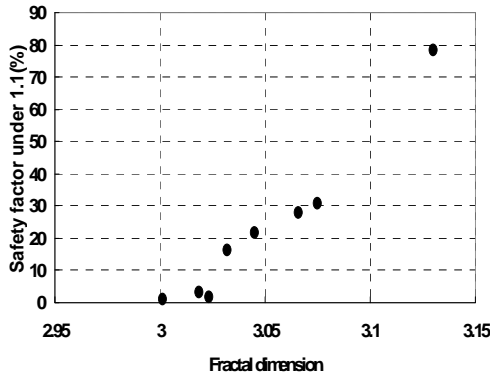
(f) F (378071)

(g) G (378034)

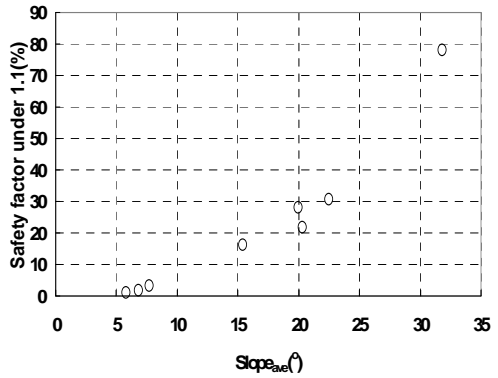
(h) H (371033)

그림 5.35 안전율 분포도

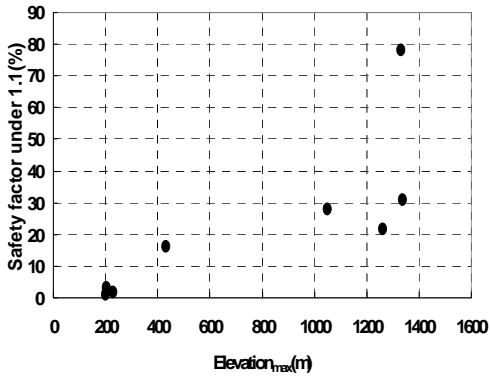
프랙탈 차원과 사면안전율과의 관계를 알아보기 위하여 프랙탈 차원에 따른 사면안전율 1.1미만의 백분율과 비교하였다. 또한 평균경사, 평균고도, 최고 고도와도 함께 알아보았다. 그림 5.36은 지형인자와 사면안전율과의 관계를 나타낸 그림이다.



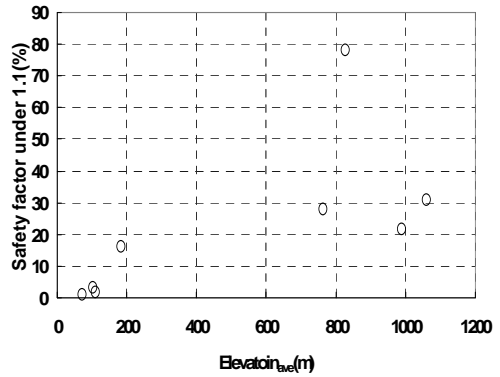
(a) Fractal dimension



(b) 평균 경사도



(c) 최고 고도



(d) 평균 고도

그림 5.36 지형인자와 사면 안전율과의 관계

위 결과를 살펴보면 프랙탈 차원이 커짐에 따라 사면안전율이 낮은 지역이 증가함을 알 수 있다. 이는 같은 조건 하에서 지형의 기복이 클수록 사면 안전율이 낮아진다는 것을 말한다. 또한 평균 경사도가한 증가함에 따라 안전율이 낮아지는 것을 볼 수 있지만 고도와는 큰 관계를 찾아보기 힘들었다. 이를 통해 고도의 고저보다는 경사가 급하고 기복이 심할수록 안전율이 작아진다는 것을 알 수 있었다.

마. 결론

이론적으로 지형의 기복이 큰 지형은 프랙탈 지수가 크게 나온다는 것을 이용, 대상지에 대한 무한사면안정해석 결과와 프랙탈 지수와의 비교를 통해 그 적용성을 평가하고 각 지형에 따른 사면안정성을 GIS에 도시하였다. 비교 결과는 다음과 같다.

- ① 프랙탈 차원과 표면적 지수의 산출 결과 프랙탈 차원은 3.0013~3.1298의 분포를 보였다. 대상 지역에 대한 지반조건들을 가정하여 무한사면 사면안정해석법을 실행한 결과, 위험지역으로 분류되는 안전율 1.1미만의 백분율은 1.01~78.24%로 나타났다.
- ② 안전율 해석 결과와 프랙탈 차원 및 표면적 지수를 비교해본 결과 각 지수가 증가함에 따라 불안정한 지역도 증가한다는 것을 알 수 있었다. 다른 조건들과의 비교를 위하여 평균경사도와 평균 고도와의 비교 결과, 평균 경사도와 비슷한 경향이 나타났다.

5. 식생인자 영향 조사

가. 목적

식생은 뿌리에 의한 토양의 안정화로 자연사면의 전단강도를 증가시킨다고 알려져 있다. 표층 붕괴에 대한 식생의 방지 효과는 식생의 뿌리가 지반내부에서 토양과 함께 매트릭스를 구성하여 지반을 강하게 고정, 지지하여 슬라이딩이나 붕괴를 방지하는 것이다. 실제로 자연사면에 있어서 식생의 유무는 사면의 안전에 많은 영향을 주고 있다. 따라서 식생의 보강효과와 사면의 안전율에 미치는 영향을 분석하여 사면안정성 평가 시스템 상에서 식생의 영향을 고려하고자 한다.

나. 식생에 의한 물리적 특성

1) 개요

임의의 사면에서 파괴가 발생하면 흙과 뿌리의 합성체는 파괴에 의해 밀려 나가는 부분과 그렇지 아니한 두 부분으로 나뉘게 되고 전단면상의 토괴를 관통하는 뿌리에는 파괴에 의한 변위가 커질수록 인장 응력이 증가하게 되며, 이에 의해 전단저항이 증가하게 된다. 뿌리에 의한 전단강도 증가는 뿌리의 형태에 따라서 전단면에 수직인 뿌리보강 효과와 전단면에 기울어진 뿌리보강 효과로 구분할 수 있다.

전단강도의 증가를 예측하기 위한 이론적 모델은 Waldron(1977), Wu et al.(1979) 등에 의하여 발달되어져 왔다. 직접전단시험에 의한 이들의 모델은 사면의 붕괴전단면에

서 뿌리의 붕괴저항력(C_R)을 흙의 Coulomb강도 식에 넣어, 붕괴발생에 대한 흙과 뿌리의 저항력을 포함한 강도 R_t 를 식(5.115)로 나타내었다.

$$R_t = C + C_R + \sigma \tan \phi \quad \text{식 5.115}$$

C : 점착력

C_R : 뿌리의 붕괴저항력

σ : 수직응력

ϕ : 내부마찰각

2) 전단면에 수직한 뿌리보강 효과

Wu(1976)는 흙의 전단강도에 있어서, 뿌리로 인하여 전단력의 증가를 예측하기 위한 전단면에 수직한 뿌리보강 모델을 개발하였다. 이 모델은 그림 5.37에서 보는 것과 같이 유연하고 탄성적인 뿌리가 평행한 전단영역을 수직으로 뺏어있다고 가정하고 뿌리의 인장력에 의한 흙의 전단강도 증가를 예측하였다.

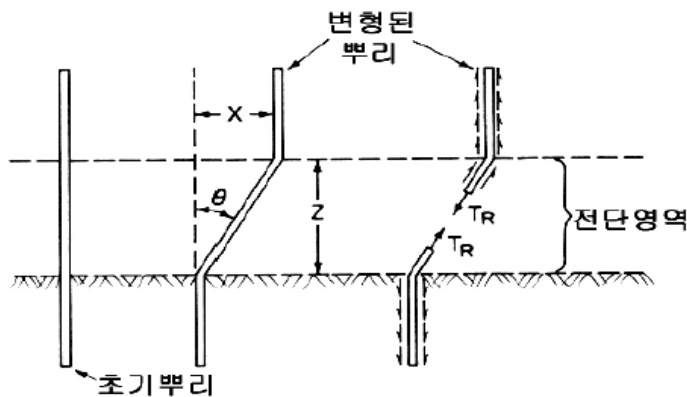


그림 5.37 전단면에 수직한 뿌리보강 모델

뿌리보강 모델은 아래와 같은 몇 가지 가정을 전제로 한다(Waldron(1977), Wu(1979)).

- ① 뿌리는 전단영역 주변에 마찰이나 점착에 의해 빠져 나오지 않도록 충분한 길이를 가지고 고정되어 있다.
- ② 표면 침식을 고려한 뿌리의 초기 방향은 수직이다.
- ③ 뿌리의 인장 강도가 모두 동원된다. (뿔히는 것이 아니라 인장력에 의해 끊어짐)
- ④ 뿌리는 흙의 내부 마찰각을 변경시킬 수 있다.

이 모델에 따르면 토괴에 전단이 발생 시 뿌리에서 일어나는 인장력은 전단에 직접적으로 저항하는 전단면에 평행한 부분과 전단 영역의 구속응력을 증가시키는 전단면에 연착한 부분으로 나뉘게 되고, 이 두 가지 힘에 의해 전단응력이 증가하게 된다. 모델에 의해 예측되는 인장력에 의한 단위면적당의 뿌리 저항력, 즉 뿌리에 의한 전단 강도의 증가 ΔC_R 은 식(5.116)과 같다.

$$\Delta C_R = S_R(\sin\theta + \cos\theta \tan\phi) \quad (5.116)$$

S_R : 흙의 단위면적당 뿌리의 평균 인장강도

θ : 전단 비틀림각, $\tan^{-1}(X/Z)$

ϕ : 흙의 내부 마찰각

X : 뿌리 변형거리

Z : 전단영역

여기서, 흙의 단위면적당 뿌리의 평균인장강도(S_R)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_R = T_R(A_R/A) \quad (5.117)$$

T_R : 임의의 전단면에 존재하는 뿌리만의 평균 인장강도

A_R : 임의의 전단면에 포함되어 있는 뿌리의 전체 면적

A : 임의의 전단면의 면적

한편, 임의의 전단면에 포함되어 있는 뿌리의 전체 면적(A_R)은 일일이 전단면 내의 각각 뿌리의 면적을 구하기 어려우므로 일정한 간격으로 뿌리의 면적을 분류하여 식

(5.117)과 같이 구할 수 있다.

$$A_R = \sum A_i \cdot N_i \quad (5.118)$$

A_i : i Class 안에 있는 뿌리의 평균 면적

N_i : i Class 안에 있는 뿌리의 개수

따라서, 식(5.117)를 식(5.116)에 대입하여 식(5.118)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta C_R = T_R(A_R/A)(\sin\theta + \cos\theta \tan\phi) \quad (5.119)$$

식(5.119)에 의하면 뿌리에 의한 전단강도의 증가(ΔC_R)는 뿌리의 인장강도와 면적 비율, 또한 전단 비틀림각과 흙의 내부마찰각에 의한 값에 의존한다고 볼 수 있다.

Waldron(1977)이 뿌리가 있는 토양을 실험실에서 직접 전단 실험한 결과 전단 비틀림각(θ)이 40~50° 범위에서 나타났으며, Wu(1976)가 현장 경사면의 토양을 관측한 결과 45~70° 범위로 측정되었다. 또한 민감도분석(Parametric variation or sensitivity analysis)을 한 결과 뿌리의 전체 인장강도의 동원은 흙의 내부마찰각(ϕ)이 25~40°, 전단 비틀림각(θ)이 40 ~70° 일 때 $\sin\theta + \cos\theta \tan\phi$ 의 값이 1.0~1.3 사이로 내부마찰각(ϕ)과 전단 비틀림각(θ)의 변화에 대하여 비교적 둔감하게 나타났다.

따라서, 평균값인 1.15를 택하여 식(5.119)를 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\Delta C_R = 1.15 T_R(A_R/A) \quad (5.120)$$

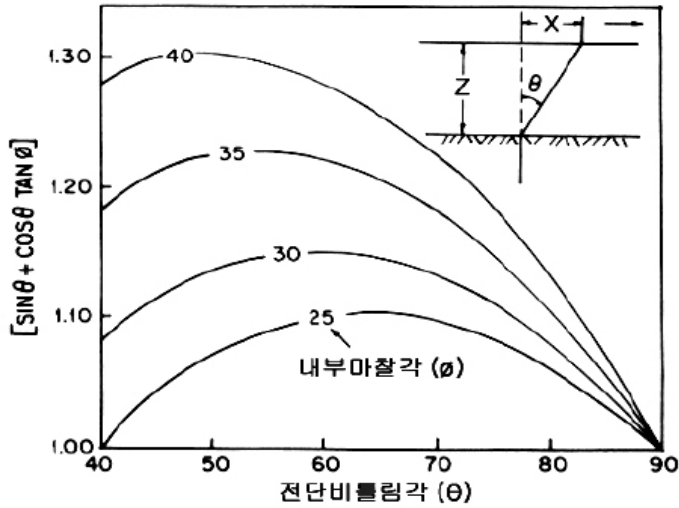


그림 5.38 마찰각과 비틀림에 따라 계산된 범위

3) 전단면에 기울어진 뿌리보강 효과

전단면에 수직인 뿌리보강 모델은 표면침식을 고려하여 뿌리의 초기 방향은 수직이라고 가정하고 해석하였다. 하지만 실제로 뿌리는 무작위하게 분포하고 있으므로 좀 더 현실적으로 해석하기 위해서는 뿌리의 초기 기울각을 고려해 주어야 할 것이다. 초기 기울각이 90°이상일 경우는 인장보다는 압축을 받는 경향이 강한 것으로 관찰되었다. 그림 5.39는 초기 기울각을 고려한 모델의 설명이다. Gray and Leiser(1982)는 이 모델에 의해 뿌리에 의한 전단강도 증가를 식(5.121)과 같이 나타내었다.

$$\Delta C_R = T_R(A_R/A)[\sin(90-\theta) + \cos(90-\theta)\tan\phi] \quad (5.121)$$

$$\theta : \tan^{-1} \frac{1}{k + (\tan i)^{-1}}$$

i : 전단 영역에 대한 뿌리의 초기 기울각

k : X/Z

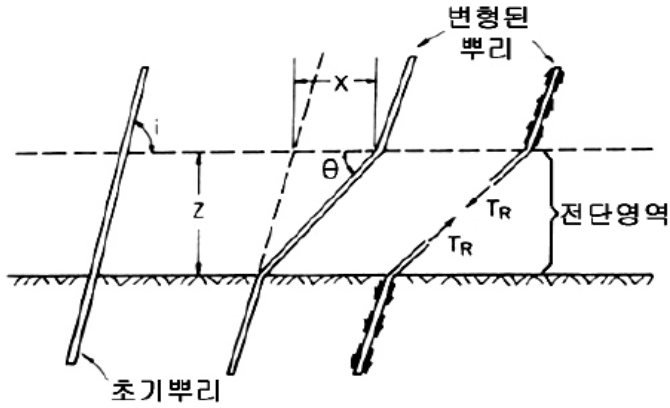


그림 5.39 전단면에 기울어진 뿌리보강 모델

전단 영역에 대한 뿌리의 초기 기울각(i)과 인장으로 변형된 비율 $k = X/Z$ 에 따라 $\Delta C_R = T_R(A_R/A)[\sin(90-\theta) + \cos(90-\theta)\tan\phi]$ 의 값은 그림 5.40와 같은 범위를 갖는다.

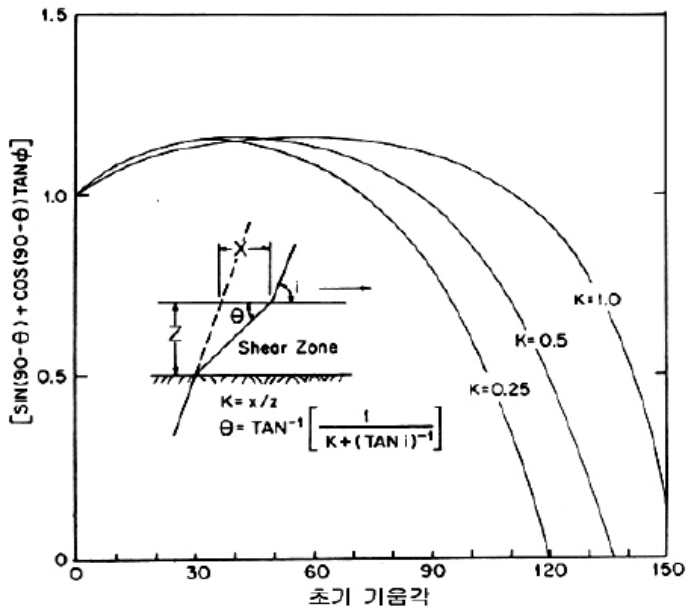


그림 5.40 초기 기울각에 의해 계산된 범위

이러한 두 가지의 뿌리보강 모델에 있어서 Gray and Ohashi(1983)는 전단면에 수직
한 뿌리와 무작위하게 분포한 뿌리에 대해 같은 조건에서 실험과 결과 그림 5.41와 같
이 두 경우 간에 매우 유사한 결과를 얻음으로써 무작위하게 분포한 전단면에 기울어
진 뿌리에 대해서도 전단면에 수직한 뿌리보강 모델을 적용할 수 있음을 밝혔다.

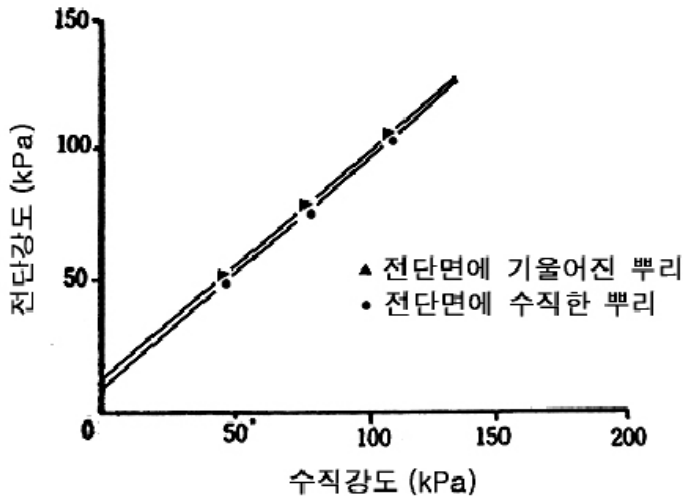


그림 5.41 수직한 뿌리와 기울어진 뿌리의 전단강도 비교

그러나 목질화 된 굵은 뿌리의 경우는 휨 파괴에 의해서 파괴된 경우도 있을 수 있
다고 보아 인장응력만으로 계산된 값이 휨응력에 의한 뿌리의 저항력 값보다 상당히
과대 평가되고 있다고 알려져 있다.

이인모 등(1991)은 실험에 의해 실제 사면에서는 흙의 전단파괴 시, 뿌리의 인장응력
은 전체인장강도의 50% 정도가 동원되므로 Wu 등(1979)에 의해 제안된 식(5.120)을
자연사면에 적용하기 위해서는 상수 1.15를 0.6으로 수정하여 식(5.122)과 같이 나타내
었다.

$$\Delta C_R = 0.6 T_R (A_R / A) \quad (5.122)$$

다. 식생에 의한 수문학적 특성

식생의 손실이나 제거는 침식률을 증가시키고 사면의 파괴 빈도를 증가시킬 수 있다.
이러한 원인과 결과의 관계는 확실하게 식생의 중요함을 보여주는 것이라 할 수 있다.

거의 대부분의 경우에 대해서 식생은 사면의 안정에 기여하나 때로는 그 반대의 경우도 있다. 예를 들어 전방을 훼손하고 사면에 자라는 수종의 성장을 방해하기도 한다. 하지만 이러한 측면은 사면의 안정화라는 관점에서는 중요치 않다고 할 수 있다. 따라서 사면의 안정을 위해서는 식생을 시공하는 것은 합리적이라 할 수 있으며 이러한 사실에 근거하여 더 효과적인 결과를 위해서 식생의 올바른 선택은 중요하다. 밀도 있는 초생류의 피복은 강우나 바람에 의한 토양침식을 효과적으로 방지하며, 깊은 뿌리의 나무는 얕은 사면 파괴를 방지하는데 효과적이다.

2) 토양 표층침식에 대한 식생의 영향

가) 사면안정화 메커니즘

강우에 의한 침식에 대하여 식생은 중요한 역할을 한다. 식생이 없는 지표에서의 토양침식은 식생이 존재하는 지표에 대해서 수백 배에 이른다는 연구결과(USDA Soil Conservation Service, 1978)도 있다. 식생의 효과를 자세히 좀 더 자세히 나타내면 다음과 같다.

- ① 강우 차단 : 식생의 잎이나 잔여물이 강우의 에너지를 감소시켜 토양에서 직접 반발을 일으키는 것을 방지한다.
- ② 식생 뿌리에 의한 구속 : 뿌리는 물리적으로 흙입자의 결속을 강화시켜 침식을 방지한다.
- ③ 표면유출속도의 둔화 : 식생의 줄기와 낙엽은 표층의 조도를 증가시켜 흐름의 유출속도를 늦추며 이는 침식을 감소시킨다.
- ④ 침투 증가 : 식생 뿌리와 잔여물(낙엽, 등)은 토양의 공극이나 투수성을 유지하게 도와주며, 이는 침투를 증가시켜 표면유출을 감소시킨다.

나) 식생피복인자

토양 침식에 대한 식생의 영향은 USLE(Universal Soil Loss Equation)을 살펴봄으로서 쉽게 이해할 수 있다.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (5.123)$$

A : 토양 유실량
R : 강우 인자
K : 토양 침식인자
L : 사면 길이인자
S : 사면 기울기인자
C : 식생인자
P : 침식 방지공 인자

USLE는 간단하고 직접적으로 토양유실에 대한 정보를 제공하며 여러 인자가 토양침식에 관여함을 보여준다. 기상적인 인자 R, 지형적인 인자 LS 및 K는 그 변화의 폭이 한정적이나, 식생인자 C와 같은 경우는 식생의 선택, 유지 및 시공에 의해 수배에서 수십배의 변화를 보인다. 따라서 토양유실량에 대하여 식생은 큰 변수라고 할 수 있다.

3) 사면 내 안정에 대한 식생의 영향

가) 수문학적 영향

식생의 수문학적 영향은 다양하며 이는 그림 5.42을 통하여 간단하게 설명할 수 있다.

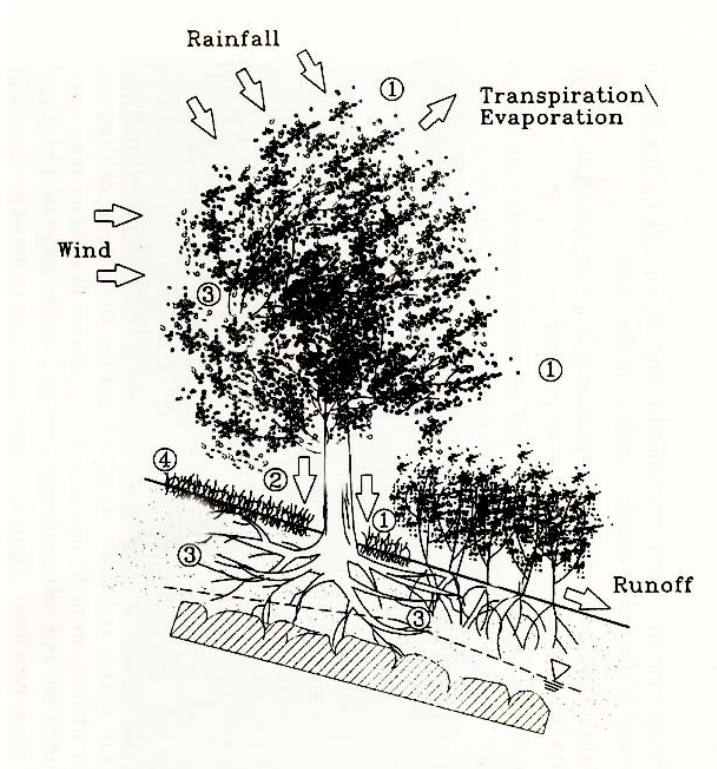


그림 5.42 사면에서 식생의 수문학적 영향

- ① 식생의 잎은 강우를 차단하여 침투 될 수 있는 양을 감소시킨다.
(사면안정에 긍정적)
- ② 낙엽과 줄기는 표면의 조도와 침투성을 증가시켜 침투능을 높인다.
(사면안정에 부정적)
- ③ 증발산을 통하여 토양 내 수분을 배출하여 공극수압을 낮춘다.
(사면안정에 긍정적)
- ④ 토양 내 수분 감소는 크랙을 유발시켜 침투능을 높인다.
(사면안정에 부정적)

라. 연구 대상 사면의 식생 및 뿌리보강 효과

1) 연구 대상 사면의 식생

연구 대상 사면은 경기도 장흥면 돌고개에 위치하며 그림 5.43은 연구지역의 임상도를 나타낸다. 연구지역은 임상 분류상 잣나무 지역인 PK에 속한다는 것을 알 수 있다.

임상도 상의 자세한 설명은 표 5.17에 나타내었다.

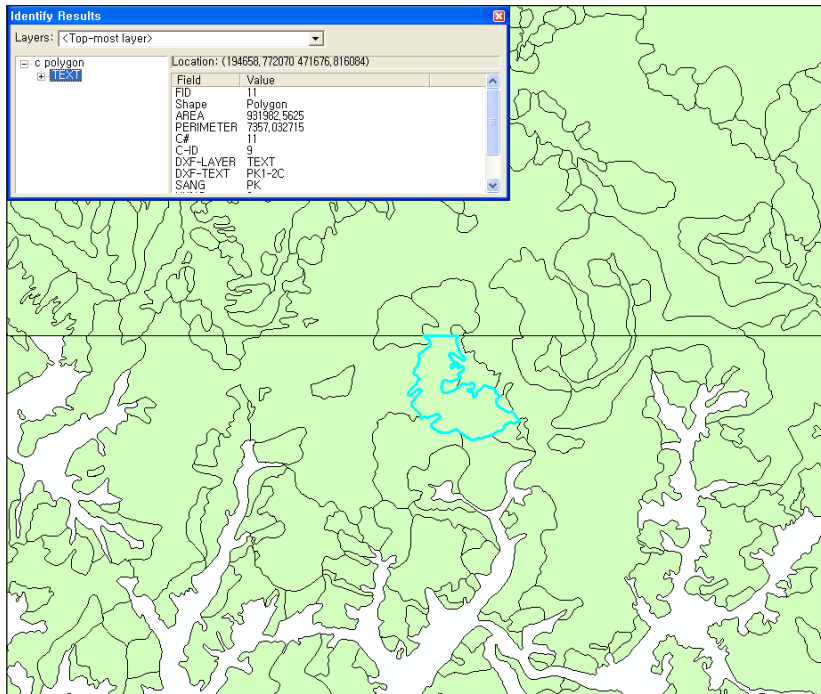


그림 5.43 연구지역 임상도

표 5.17 임상정보(SANG)

부호	임황	구분기준
C	침엽수림	침엽수의 수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75%이상
H	활엽수림	활엽수의 수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75%이상
M	침활혼효림	침엽수와 활엽수의 수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 각각 25% 이상 75% 미만인 임분
CA	밤나무림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75%이상
PD	소나무 인공림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75%이상
PK	잣나무림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75%이상
PL	낙엽송림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75%이상
PR	리기다소나무림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75%이상
PQ	참나무 인공림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75%이상
Po	포푸라림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75%이상
D	소나무림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75%이상
Q	참나무림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75%이상
B	죽림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75%이상
PC	침엽수 인공림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75%이상
PH	활엽수 인공림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75%이상
O	미임목지	지피와 수관의 총 피복도가 50% 이상인 임지
L	경작지	과수원, 기타 농경지, 묘포장 등이 임지내에 있는 농용지역
R	제지	도로, 암석지, 묘지 및 묘포장 등이 임지내에 있는 농용지역
LP	목장	목장

2) 연구 대상 사면의 뿌리보강 효과

조주형 등(2000)은 잣나무 뿌리의 직경과 인장저항력과의 관계를 파악하기 위하여 20개의 뿌리에 대해 만능재료 강신도 시험기(Instron C.R.E 4320)를 이용하여 인장강도를 구하였으며 실험결과는 표 5.18과 같다.

표 5.18 잣나무 뿌리의 역학적 성질

번호	직경 (mm)	강도 (kgf)	응력 (kgf/cm ²)	변형률	초기탄성계수 (kgf/cm ²)
1	2.200	15.110	397.502	0.045	8820.83
2	4.200	26.680	192.578	0.045	2267.15
3	3.150	15.700	201.464	0.068	3182.86
4	1.950	17.150	574.268	0.035	14771.07
5	2.500	23.090	470.396	0.079	8531.73
6	2.600	12.810	241.281	0.029	6620.40
7	3.000	10.790	152.651	0.059	2843.26
8	4.300	50.580	348.307	0.156	7616.45
9	1.000	7.114	905.803	0.056	18970.79
10	1.600	2.980	148.216	0.092	2136.36
11	1.600	16.810	836.08	0.068	14366.12
12	0.800	2.872	571.379	0.125	9079.50
13	2.400	20.110	444.539	0.072	10652.08
14	1.750	13.290	552.546	0.077	10659.07
15	0.800	2.362	469.916	0.074	9613.57
16	3.700	59.010	548.835	0.070	13283.14
17	2.500	16.860	343.477	0.145	6371.45
18	3.600	22.150	217.615	0.122	6593.68
19	3.000	21.610	305.726	0.108	9096.11
20	3.000	37.770	534.348	0.027	20362.92
평균	2.483	19.742	422.846	0.078	9291.92

잣나무의 뿌리 직경과 인장강도의 관계는 그림 5.44와 같으며 회귀분석을 실시한 결과 다음과 같은 회귀식을 도출하였다.

$$Y = 4.446X^{1.4802} \quad (R^2 = 0.7203) \quad (5.124)$$

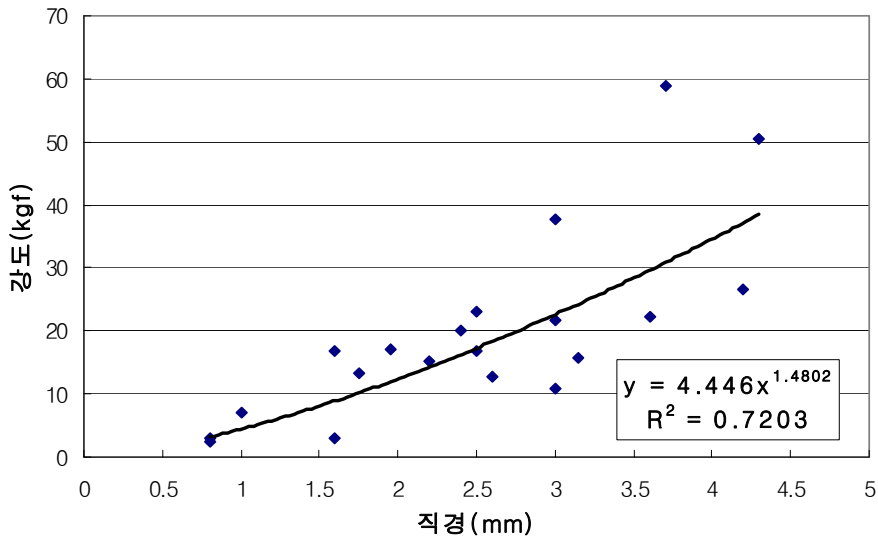


그림 5.44 잣나무 뿌리의 직경과 인장강도의 관계

잣나무 뿌리의 전단저항력은 실험결과의 평균값을 사용하였으며, 적용 모델식은 이인모 등(1991)에 의해 수정된 식을 사용하였다. 잣나무 뿌리의 면적비율은 문헌을 통하여 Noboru(1979), Gray and Leiser(1982), Schiechl(1980)의 연구를 바탕으로 대부분 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 사이에 분포하는 것으로 알려져 있으며 일반적인 값인 0.1% 즉, 10^{-3} 로 하여 잣나무 뿌리의 전단저항력을 구하였다.

표 5.19 잣나무 뿌리의 전단저항력

수 종	평균인장강도 (kg/cm ²)	면적비율 (A_R/A)	전단저항력 (kg/cm ²)	모델식
잣나무	422.846	10^{-3}	0.253	$\Delta C_R = 0.6 T_R (A_R/A)$

마. 결론

사면안정에 대한 식생의 영향은 수목근계에 의한 보강효과에 의하여 뿌리를 포함한 흙의 전단강도가 증가하는 것으로 나타나며, 이는 흙의 강도를 표시하는 점착력(C), 내부마찰각(ϕ)의 성분 가운데 식생뿌리에 의한 강도증가는 주로 점착력 성분의 증가로

볼 수 있다. 따라서 뿌리 보강에 의한 흙의 전단강도는 뿌리의 붕괴저항력을 추가하여 식(5.115)로 나타낼 수 있다.

연구 대상지의 식생은 대부분 잣나무이며 잣나무 뿌리의 붕괴저항력(C_R)은 0.253 kg/m^2 으로 나타났다. 연구 대상지의 평균 점착력(C)는 9 kPa , 내부마찰각은 15.6° 이므로 연구 대상지의 뿌리보강에 의한 전단강도의 증가는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_t = 9 + 24.8 + \sigma \tan 15.6 \quad (\text{kN/m}^2) \quad (5.125)$$

6. 요약 및 결론

본 장에서는 불포화토의 특성과 지반의 고유 특성인 함수특성곡선과 강도특성을 분석하기 위한 시험을 실시하고 분석하였다. 그리고 이를 바탕으로 침투특성이 사면안정에 미치는 영향을 보다 정확하게 규명하기 위하여 Green and Ampt 모델을 기반으로 한 Chu 모델에 수분재분포를 고려하여 수정된 침투모델을 제안하였다. 또한 식생이 사면안정에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

- ① 선정된 시료 5가지에 대하여 함수비, 포화도 및 체적 함수비를 분석하여 흙-수분 특성곡선을 도출한 결과 흡인력과 함수비로 도시된 특성곡선에서 흡인력의 변화에 따른 함수비의 특성은 낮은 흡인력에서는 명확하게 구분되었으며, 흡인력에 따른 포화도 특성은 초기에는 구분이 거의 되지 않지만 건조과정이 진행되면서 그 특성을 나타내게 되어 건조된 시료의 흙-수분 특성곡선을 파악하는데 적용할 수 있다. 또한 흡인력에 따른 특성곡선을 체적 함수비로 나타내면 초기 포화부분뿐만 아니라 건조과정이 진행된 후에도 구분이 명확하게 나타났다.
- ② 불포화토의 전단거동을 밝히기 위해 삼축시험을 수행한 결과 순구속압이 일정할 경우에는 흡인력이 증가할수록 피크시 강도는 더 높은 변형률에서 나타났고, 이것은 동일한 흡인력을 가해도 순구속압이 증가하면 흡인력의 영향이 감소하는 것을 나타내며, 시료에 흡인력을 가하면 축차응력-변형률 관계에서 파괴는 점차 작은 변형에서 발생한다고 판단된다. 불포화토의 강도특성에 영향을 주는 인자로는 순구속압과 흡인력인 것으로 나타났으며, 전단강도는 흡인력의 증가에 따라 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 흡인력에 따른 축차응력의 변화는 순구속압이 증가하면서 축차응력도 증가됨을 알 수 있었으며, 축차응력의 증가량은 순구속압보다 흡인력의 변화에 더 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 순구속압과 흡

인력이 일정할 경우에는 다짐률이 감소함에 따라 피크시 강도는 더 높은 변형률에서 나타났고, 이것은 동일한 흡인력을 가해도 다짐률이 감소하면 흡인력의 영향이 증가하는 것을 나타내며, 시료의 간극비가 증가함에 따라 축차응력-변형률 관계에서 파괴는 점차 큰 변형에서 발생한다고 판단된다. 불포화토의 전단강도는 흡인력에 따라 증가하며, 전단강도는 흡인력의 증가에 따라 비선형 관계에 있음을 알 수 있었고, 불포화상태에서 전단강도정수는 흡인력에 따라 내부마찰각과 점착력이 증가하는 경향을 보였고 흡인력이 불포화토의 강도특성이 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있었다.

- ③ 자연사면에서 강우침투시 포화깊이를 산정하기위해 강우침투모델인 Chu 모델을 수정하여 수정된 침투모델을 제안하고 제안된 모델에 의한 해석결과와 현장 계측 결과를 비교한 결과 ponding 조건에서 수정된 침투모델과 Chu Model이 유사한 결과를 주었으며 계측된 체적함수비 분포와도 잘 일치하였다. Non-ponding의 경우 본 연구에서 제안된 수정된 침투모델에 의해 산정된 포화깊이는 0이었으며, 예측된 함수비는 계측된 체적함수비와 잘 일치하였다. 하지만 Chu 모델은 수분의 재분포를 고려하지 않으므로 포화영역이 없음에도 포화깊이를 산정하였으며, 따라서 포화깊이를 과대 산정할 수 있으며, 포화 영역에서는 불포화 지반을 유지하는 음의 간극수압이 사라지게 되므로 Chu 모델에 의한 해석결과는 사면의 안정성을 계측된 자료에 비해 낮게 평가할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 수정된 침투모델에 의한 침투해석이 합리적인 것으로 판단된다.
- ④ 지형의 기복을 나타낼 수 있는 지형인자를 산출하기 위하여 프랙탈 차원을 계산하였다. 산출된 프랙탈 차원과 고도, 경사도 등 다른 지형인자와 무한사면 사면안정해석 결과와 비교하였다. 안전율 해석 결과와 프랙탈 차원을 비교해본 결과 각 지수가 증가함에 따라 불안정한 지역도 증가한다는 것을 알 수 있었다. 다른 조건들과의 비교를 위하여 평균경사도와 평균 고도와의 비교 결과, 고도요소는 큰 연관성을 보이지 않았으나 경사도와는 비슷한 경향이 나타났다.
- ⑤ 사면안정에 대한 식생의 영향은 수목근계에 의한 보강효과에 의하여 뿌리를 포함한 흙의 전단강도가 증가하는 것으로 나타나며, 이는 흙의 강도를 표시하는 점착력(C), 내부마찰각(ϕ)의 성분 가운데 식생뿌리에 의한 강도증가는 주로 점착력 성분의 증가로 볼 수 있다. 연구 대상지의 식생은 대부분 잣나무이며 잣나무 뿌리의 강도정수를 이용하여 연구 대상지의 뿌리보강에 의한 전단강도의 증가식을 제안하였다.

제 4 절 지형패턴 분석을 통한 자연사면 위험성 해석기법의 개발

1. 개요

역학적 기법을 이용한 광역 산사태 위험지 예측 연구에서는 지금까지 주로 무한사면 안정해석모형을 사용해오고 있는데, 이 모형은 지리정보시스템에서 셀 단위로 계산이 수행되며, 지형인자 중에서 경사만을 고려하여 안전율을 산정되므로 지형의 굴곡을 고려하지 못하는 단점이 있으며, 토심이 깊어짐에 따라 안전율의 정확성이 낮아지는 문제점이 있다. 반면, 지형을 고려할 수 있는 2차원 사면안정해석은 실제의 사면안전율을 계산할 수 있는 장점이 있지만, 파괴면을 찾기 위해 많은 반복계산을 수행해야 하는 등 지리정보시스템 내에서 2차원 사면안정해석모형을 적용하는 것은 매우 어렵다. 그러므로, 지리정보시스템에서 간편하게 굴곡을 고려한 사면안정해석을 할 수 있는 기법을 개발하는 것이 필요하다.

본 장에서는 자연사면에서 지형(굴곡)의 변화에 따른 안전율의 변화추이를 이용하여, 자연사면의 안전율과 평균경사도로 표현한 평탄사면의 안전율을 비교·분석하여 굴곡을 고려한 해석의 필요성을 제기한다. 또한 단일셀 해석에서는 사면 굴곡의 변화가 안전율에 미치는 영향을 고려하지 못한다는 한계점을 가지고 있다. 따라서 다중셀을 이용하여 사면 굴곡이 안전율에 미치는 영향을 분석하였다.

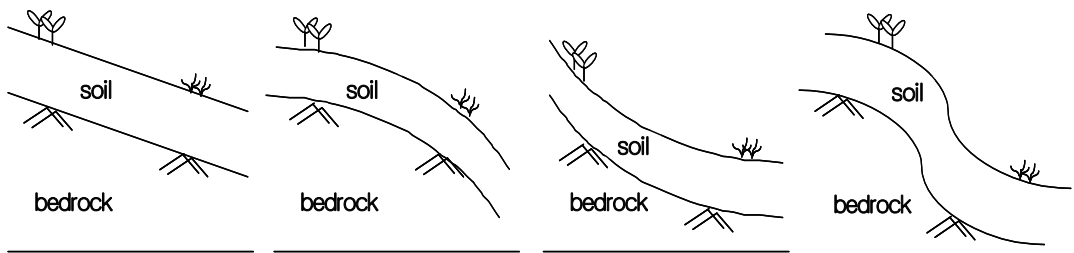
2. 사면형상 추출 및 지형패턴 분석

가. 목적

자연사면에서 지형(굴곡)의 변화에 따른 안전율의 변화추이를 이용하여, 자연사면의 안전율과 평균경사도로 표현한 평탄사면의 안전율을 비교·분석하여 굴곡을 고려한 해석의 필요성을 제기한다.

나. 자연사면형상

산지지형에서 사면의 위험성 해석은 주로 사면의 종단방향에 대하여 수행된다. 지금까지 광역적인 자연사면의 산사태 위험성 평가연구에서는 자연사면의 곡률, 기하학적 형태 등을 무시하고 평행사면(flat)으로 간주하여 경사도만을 인자로 취급하여왔다. 그러나, 실제 자연사면은 평행사면과는 달리 다양한 굴곡이 존재한다.



(a)flat-parallel (b)convex-parallel (c)concave-parallel (d) compound-parallel

그림 5.45 자연사면의 형상

그림 5.45에서 지표면의 형태가 4가지로 나타나는 반면, 지표면과 기반암과의 위치관계는 평행관계(이승기, 2000)외에도 증가, 감소 등의 3가지 기본관계가 나타나며 이 외에도 국부적으로 여러 관계가 존재할 수 있다. 그러므로 어떠한 지표형태를 선정할 것인가, 어떠한 지표-기반암 관계를 선정할 것인가에 따라 산사태 해석의 결과가 달라지게 된다.

다. 국내 파괴사면의 사면형상

산사태가 많이 발생한 대표적인 지역에 대한 기존연구로부터 산사태의 발생위치, 발생지형의 형상, 발생형태, 발생규모(길이, 폭), 파괴형태 및 발생사면의 경사도를 구분하였다.

표 5.20 우리나라 몇몇 지역의 자연사면 파괴형태

발생지역	대상 개수	발생높이			지형				발생형태				발생규모			파괴형태			
		산정	산복	산록	오목	블록	평형	복합	A	B	C	D	복합	평균 길이	평균 폭	평균 경사	준호 상	병진	기타
전북 무주군(1)	53	35	16	2	43	10	0	0	28	11	11	0	3	1568	21.2				
지리, 설악, 오대, 속리, 월악 국립공원(2)	32	21	10	1	26	4	1	1											
경기 의정부(3)	102	30	67	5	75	15	10	2	34	34	23	11		55					
경기 양주	50				8	15	13	14											

(1), (2) 산림청(2003) 산사태 발생원인 및 예방대책에 관한 연구

(3) 이성근(2000) 집중호우시 산사태 원인분석에 관한 연구

파괴 사면의 형상을 살펴보면, 오목사면에서 가장 많이 나타났고, 볼록, 평탄사면이 그 뒤로 나타났다. 따라서, 지리정보시스템에서 사면안정해석시 지형의 굴곡을 고려한 해석이 필수적이다. 실제 자연사면에서 사면형태에 따라 산사태의 발생현황을 살펴본 결과 평탄한 사면뿐 아니라, -1이하의 오목사면에서 12.7% 및 1이상의 볼록사면에서 22.7%로 상당한 수의 산사태가 평형사면 이외에서 발생하는 것으로 나타났다(KINAM, 2000).

라. 파괴가능 사면의 형상 추출 및 패턴분석

연구지역은 경기도 양주군 장흥면이며, 98년, 99년도에 대규모 산사태가 발생하였다.

그림 5.46에 대상지역의 등고선과 건물, 하천 등이 표현된 수치지형도에 산사태 발생 형상을 중첩시켜 나타내었다. 등고선과 DEM을 이용하여 발생지역을 구분하고, 크기 등을 측정하여, 50개의 산사태를 추출하였으며, 그 형상을 그림 5.47에 도시하였다.

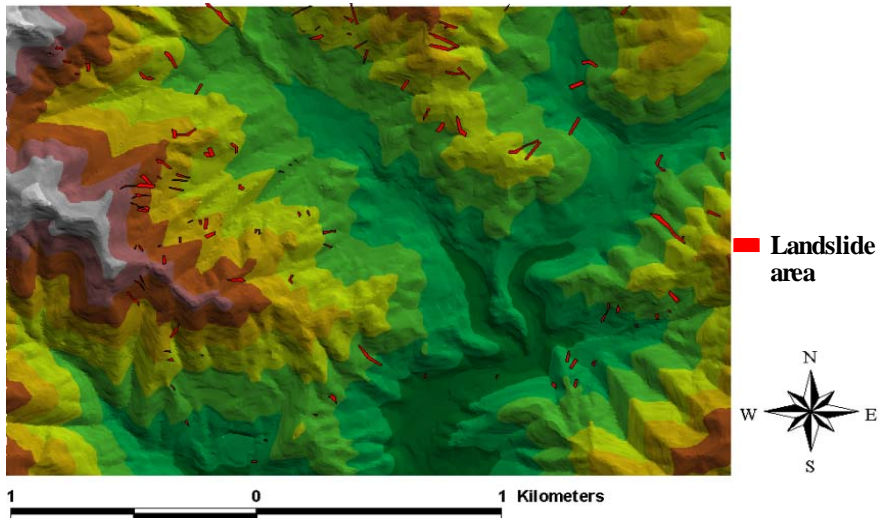
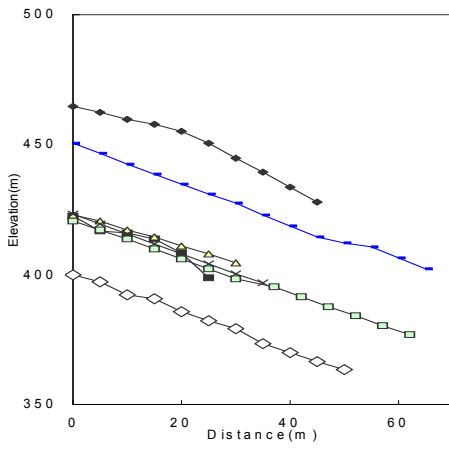
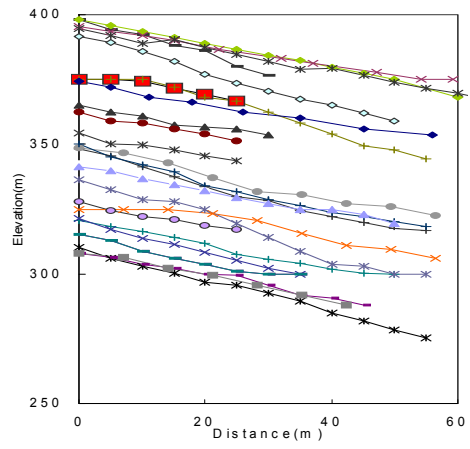


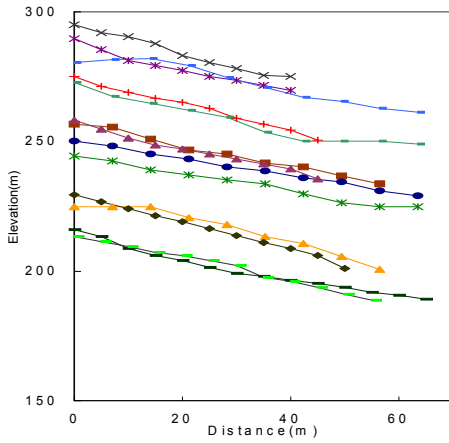
그림 5.46 연구지역에서 발생한 산사태 위치(장흥)



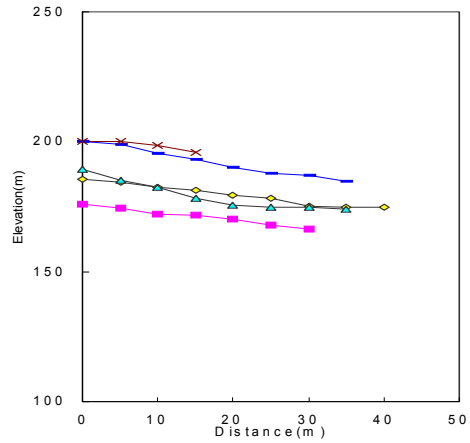
(a) Elevation : > 400m



(b) Elevation : 300~400m



(c) Elevation : 200~300m



(d) Elevation : ≤ 200m

그림 5.47 추출된 산사태 사면의 고도 및 거리 관계

50개의 산사태에 대하여 산사태가 발생한 사면의 사면길이, 시작표고, 평균경사, 최급 경사 등을 조사하였다(표 5.21).

표 5.21 발생된 산사태의 특성

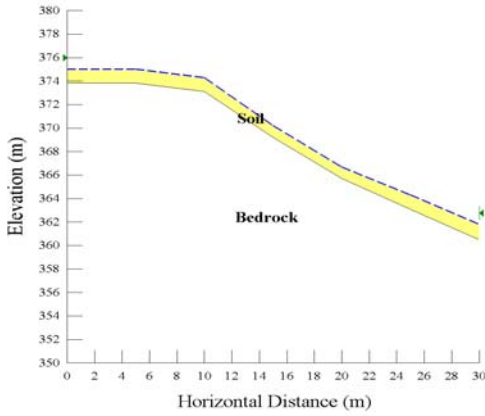
	사면 길이 (m)	고도 (m)	평균경사 (°)	최급경사 (°)	ABS($\tan\alpha - \tan\beta$)
Average	50.6	319.9	27.3	41.2	0.46(24.5°)
Minimum	15.0	175.8	9.4	21.2	0.07(4.0°)
Maximum	120.0	464.8	44.3	63.8	0.96(43.8°)

표 5.21에서 평균 길이는 50.6m이고, 시작고도는 319.9m로서 전체 50개의 산사태 중에서 38개(76%)가 시작고도200m에서 400m사이에서 발생하였다. 평균경사도는 27.3°이며, 각 사면의 최급경사의 평균값은 41.2°로 나타났다.

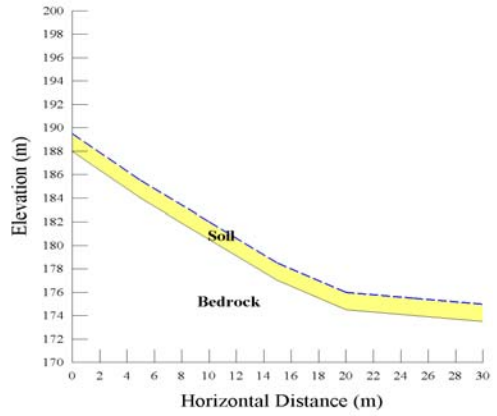
추출된 사면의 형상을 분류하면, 평탄사면 13개, 오목사면 8개, 볼록사면 15개, 복합사면이 14개로 나타났다. 이 분류는 사면의 길이가 길더라도 시작부 40m에 대해서 조사한 것으로서 사면의 전체에 대하여 분류하면 대부분 복합사면에 해당하는 것으로 나타났다.

마. 패턴별 사면안정해석

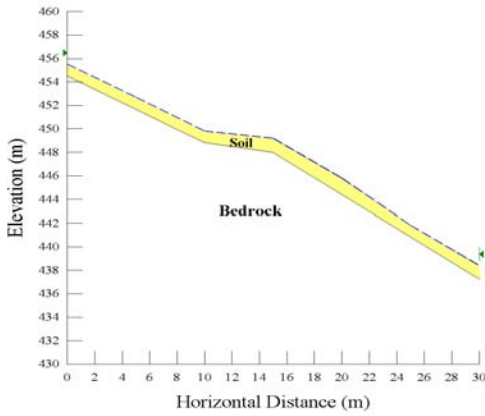
연구지역의 산사태가 발생한 사면 중에서 오목, 볼록, 평행, 복합사면의 대표적인 사면을 추출하여 셀의 개수(크기)에 따라 사면안정해석결과의 변화를 살펴보았다. 그림 5.44로부터 높이, 길이별로 구분하여 대표사면을 4개 선정하여 표고와 거리를 이용하여 사면의 형상을 추출하였으며, 이를 토심과 함께 그림 5.48에 도시하였다.



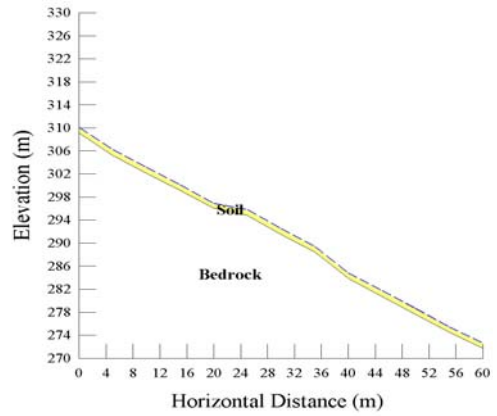
(a) Case 1(convex slope)



(b) Case 2(concave slope)



(c) Case 3(complex slope)



(d) Case 4(flat slope)

그림 5.48 추출된 대표사면 단면

그림 5.45의 (a)~(c)는 수평거리가 30m인 블록사면(a), 오목사면(b), 복합사면(c)이며, (d)는 수평길이가 60m인 평탄사면에 가까운 사면형태이다. 위 4가지 경우에 대하여, 사면의 형상에 따라 사면안전율의 변화를 나타내었다. 이때 사면안정해석을 위한 지하수위, 토심 및 토질정수의 값은 아래와 같다. 지하수위는 사면이 붕괴되는 가장 위험한 경우인 지표면에 위치하는 것으로 가정하였다.

표 5.22 사면안정해석 조건

목차	지하수위	토심 D (m)	포화단위중량 γ_t (kN/m ³)	내부마찰각 ϕ (°)	점착력 C (kPa)
평균	* 1.0 D	1.0	19.0	34.0	5.0

* D : soil depth(m)

표 5.22의 조건에 의하여 Case 1로부터 Case 4까지 사면안정해석을 실시하였으며, 그 결과를 그림 5.49에 나타내었다.

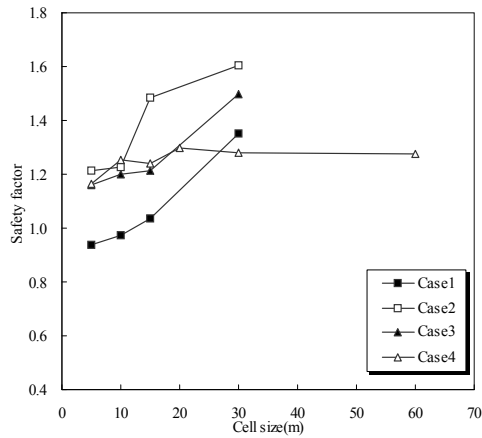


그림 5.49 자연사면에서 셀의 크기에 따른 안전율

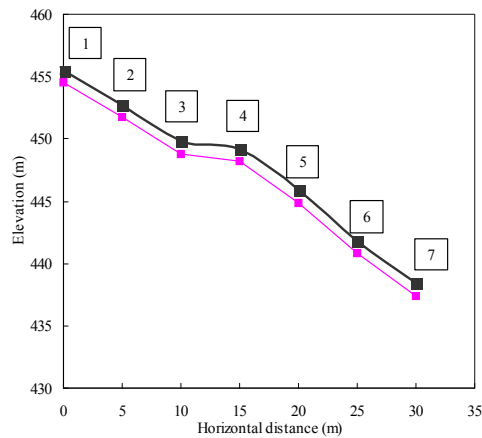
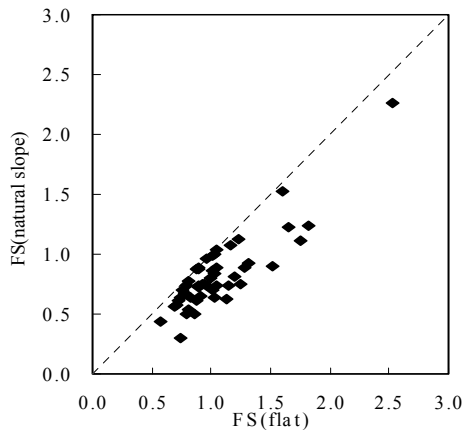


그림 5.50 다중셀 사면안정해석을 위한 사면노드 번호(Case 3)

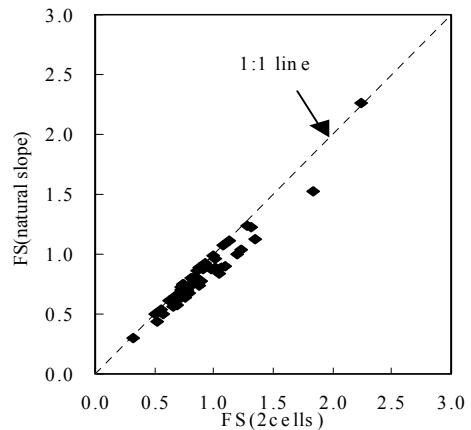
그림 5.49에서 Case 1 및 Case 3의 경우 셀의 개수가 6개, 3개, 2개일 때까지는 안전율의 크기가 일정하였다가 평탄사면이 되는 순간 안전율이 급격하게 증가하였다. Case 2에서는 셀의 개수가 6개에서 3개일 때는 안전율의 약간 감소하였다가 셀의 개수가 2개부터 안전율이 급격하게 증가하였다. 이는 지형을 표현하는 셀의 개수가 줄어들어 따라서 지형의 형태가 변하게 되고, 원 지형의 형상을 잃어버리는 순간에 안전율이 급격하게 증가하는 것으로 판단된다. 한편, Case 4에서는 12개로 표현할 때보다 6개, 4개로 표현할 때 조금씩 증가하였으며, 2개, 1개로 표현할 때까지 안전율의 증가량이 다른 사면에 비하여 작은 것으로 나타났다. 이러한 이유는 지형의 굴곡은 작은 반면에 사면의 길이는 매우 긴 것에서 기인하는 것으로 판단된다.

다음으로, 추출된 산사태가 발생한 사면에 대하여 셀의 개수에 따른 안전율의 변화를 살펴보았다. 굴곡이 있는 자연사면에 대하여 5m크기의 격자 2개로 표현되는 사면의 안전율과 격자의 개수를 3개, 4개로 증가시키면서 안전율을 비교하였다. 그림 5.50은 사면 추출을 위하여 각 노드별로 번호를 붙인 그림이다.

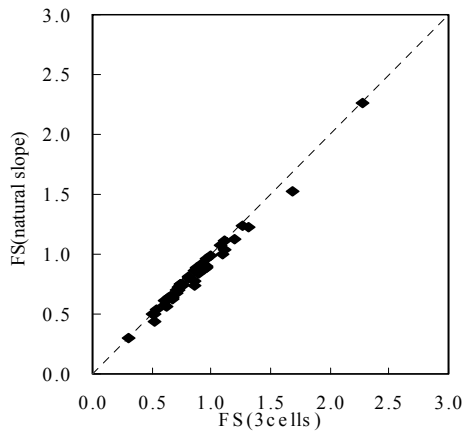
각각의 사면 전체에 대하여 산정한 안전율과 셀 2개, 3개, 4개로 이루어진 사면의 안전율 그리고 평균경사도를 가지는 평탄사면의 안전율을 5.51에 비교하였다.



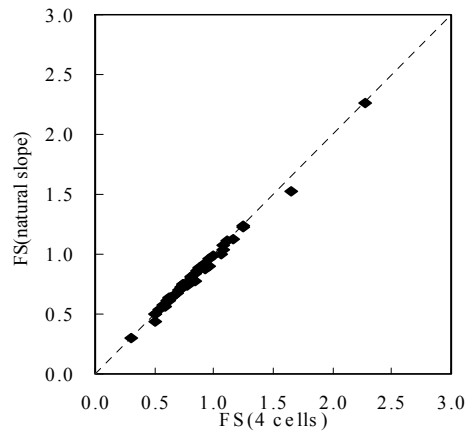
(a) Flat



(b) 2 cells



(c) 3 cells



(d) 4 cells

그림 5.51 다중셀 사면과 자연사면의 안전율 비교

그림 5.51에서 평탄사면의 안전율이 자연사면의 안전율에 비해 상당히 크게 산정되었고, 2, 3, 4개의 셀로 이루어진 사면의 안전율은 자연사면의 안전율과 상당히 유사하게 나타났다. 또한, 해석 셀의 개수가 증가할수록 자연사면의 안전율과의 차이가 줄어드는 것으로 나타났다.

그림 5.51(a)~(d)에서 각각의 안전율을 자연사면의 안전율로 나눈 값의 평균치를 도출하면, 그림 5.52와 같다.

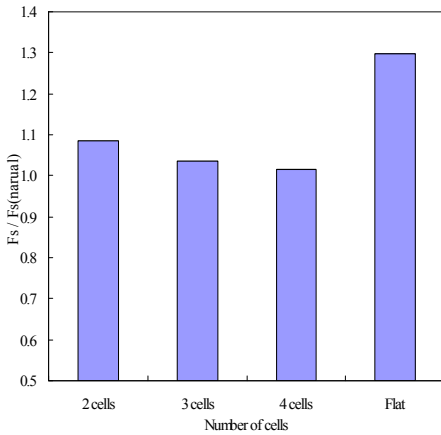


그림 5.52 평탄사면에 대한 굴곡 있는 사면의 안전율 비

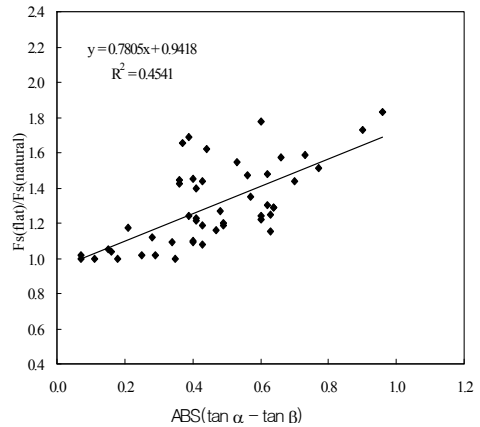


그림 5.53 굴곡과 안전율 비의 관계

그림 5.52에서 셀 2개로 이루어진 사면의 안전율의 전체 사면의 안전율에 대한 비가 평균 1.1로 나타났고, 셀 3개에서는 1.03, 셀 4개에서는 1.02로 나타났으며, 평탄사면에서는 1.3으로 나타났다. 셀의 개수가 증가할수록 자연사면의 형상에 가까워지므로 안전율이 전체 자연사면과 동일하게 되는 반면, 평탄사면은 셀의 크기가 30m이므로 경사도가 낮아져서 안전율이 커지는 것으로 판단된다.

굴곡에 따른 전체사면의 안전율과 평탄사면의 안전율을 비교하여, 굴곡($ABS(\tan \alpha - \tan \beta)$)에 따른 안전율비($F_s(\text{flat}) / F_s(\text{natural})$)의 변화를 살펴보았다.

그림 5.53에서 굴곡량에 따른 평탄사면과 전체사면의 안전율의 비는 굴곡량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그러므로, 굴곡이 큰 지형일수록 전체사면의 안전율과 평균경사도를 가지는 평탄사면의 안전율의 차이는 커지게 된다. 평탄사면에서는 굴곡($\tan \alpha - \tan \beta$)이 0이지만, 자연사면에서는 다양한 굴곡이 존재하며, 굴곡이 클수록 안전율이 낮아지게 된다.

바. 결론

지금까지 자연사면의 형태적분류와 대상지역에 대한 사면패턴분석 및 사면안정해석을 실시하였으며, 그 결과는 아래와 같다.

- ① 자연사면은 크게 볼록, 오목, 평탄, 복합사면으로 구분되며, 실제 사면파괴는 평탄

사면뿐 아니라, 오목, 블록사면에서 많이 발생하였다.

- ② 연구지역(양주시 장흥)에 대하여 산사태가 발생한 지역에 대한 추출된 사면의 형상을 분류하면, 평탄사면 13개, 오목사면 8개, 블록사면 15개, 복합사면이 14개로 나타났다. 이 분류는 사면의 길이가 길더라도 시작부 40m에 대해서 조사한 것으로서 사면의 전체에 대하여 분류하면 대부분 복합사면에 해당하는 것으로 나타났다.
- ③ 굴곡량에 따른 평탄사면과 전체사면의 안전율의 비는 굴곡량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그러므로, 굴곡이 큰 지형일수록 전체사면의 안전율과 평균경사도를 가지는 평탄사면의 안전율의 차이는 커지게 된다. 평탄사면에서는 굴곡($\tan\alpha - \tan\beta$)이 0이지만, 자연사면에서는 다양한 굴곡이 존재하며, 굴곡이 클수록 안전율이 낮아지게 된다.

3. 사면패턴별 사면 안정성 평가

가. 목적

단일셀 해석에서는 사면 굴곡의 변화가 안전율에 미치는 영향을 고려하지 못한다. 따라서 다중셀을 이용하여 사면 굴곡이 안전율에 미치는 영향을 분석하였다.

나. 배경이론

기존 연구에 의하면 실제 파괴된 사면의 형상은 평탄사면뿐 아니라 오목사면, 블록사면, 복합사면 등 다양한 사면에서 파괴가 발생하였음을 알 수 있다. 따라서, 실제사면의 형상이 안전율에 미치는 영향을 규명하기 위해서는 개개의 셀단위로 평탄사면 해석을 수행하기 보다는 사면의 형상을 고려할 수 있도록 다중셀을 정의하여 이중셀에 기반한 사면안정해석이 필요하다.

Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
Z_5	Z_6	Z_7	Z_8
Z_9	Z_{10}	Z_{11}	Z_{12}
Z_{13}	Z_{14}	Z_{15}	Z_{16}

그림 5.54 DEM에서의 Grid와 cell

그림 5.54에서 임의의 한 개의 셀은 경사방향으로 상부셀과 하부셀로 연결된다. 본 연구에서 이렇게 연결되는 2개의 이상의 셀을 다중셀이라고 정의한다. 그림 5.51에서 Z_7 셀에 대해서 다중셀이 경사방향의 상부로는 Z_3 이고 하부로는 Z_{11} 이므로, Z_3 - Z_7 , Z_7 - Z_{11} 은 2개의 셀로 이루어진 하나의 셀단위가 된다. 이러한 다중셀에서는 경사도뿐만 아니라 지형의 굴곡이 반영이 되므로, 개개 셀단위의 해석에 비해 실제사면에 대한 사면안전율에 근접한 결과를 얻게 된다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 다중셀로 이루어진 사면에 대한 안정해석을 수행하고자 한다. 2개의 셀로 이루어진 사면의 단면은 그림 5.55와 같다.

2개의 셀로 이루어진 사면에서는 $\tan \alpha$, $\tan \beta$ 에 따라 오목($\alpha > \beta$), 볼록($\alpha < \beta$), 편평($\alpha = \beta$)한 사면이 나타나게 된다.

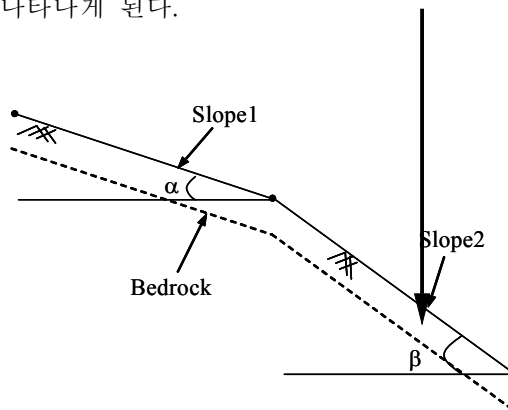


그림 5.55 slope1과 slope2로 합쳐진 사면의 개요(2 cells)

다. 연구방법

크기가 5m인 셀 2개로 이루어진 다중셀 사면에 대하여 Slope 1과 Slope 2의 경사도의 \tan 값인 $\tan \alpha$ 및 $\tan \beta$ 를 0.1~1.0($0^\circ \sim 45^\circ$)까지 0.1단위로 변화시키면서 경사도의 변화에 따라 안전율의 변화양상을 살펴보았다. 이때 파괴는 셀 2개가 동시에 파괴되는 것으로 가정하였고, 지하수위는 지표면과 일치하며, 토질정수는 연구지역의 평균값을 적용하였다. 2차원 사면안정해석에서 파괴형상은 원호파괴형상을 가정하였고, 해석기법은 Bishop의 간편법을 적용하였고 해석에 사용된 프로그램은 GEO-SLOPE 사의 Slope/W Version 5이다.

라. 결과

우선 사면의 경사도에 따른 안전율을 도시해본 결과 방사형의 모양을 나타내었다. 그렇지만, 완전한 구형은 아니며(다중셀 사면의 평균경사가 동일하더라도 사면의 안전율은 다름), 타원형의 비대칭 모양을 나타내었다. 만약 Slope 1과 Slope 2의 평균경사에 따라 안전율이 정해지면, 위 그래프는 방사형이 아닌 좌상향에서 우하향의 직선형태의 그래프가 도출되고, 만약, Slope 1과 Slope 2 중에서 최급경사에 따라 안전율이 정해진다고 가정하면, 위 그래프는 “ㄱ”자 형태의 그래프가 도출될 것이다. 그렇지만, 그래프에서는 타원형의 비대칭으로 나타나므로 이는 사면의 형상이 안전율에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

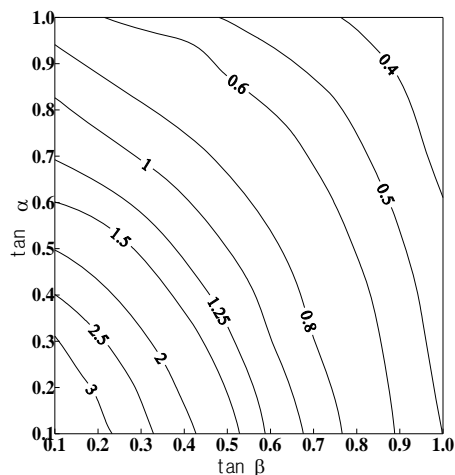
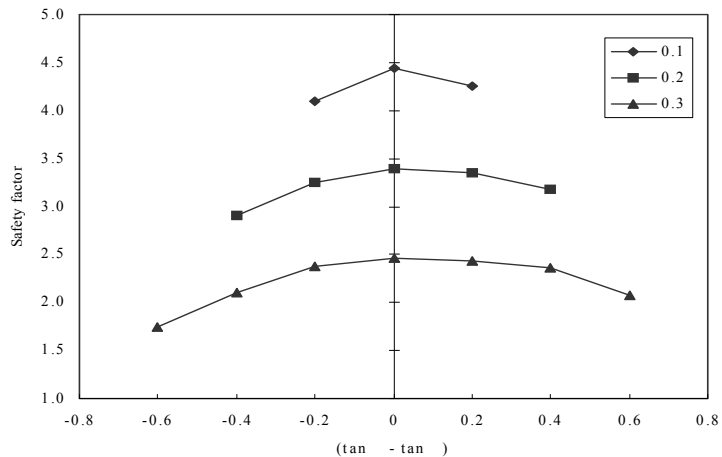


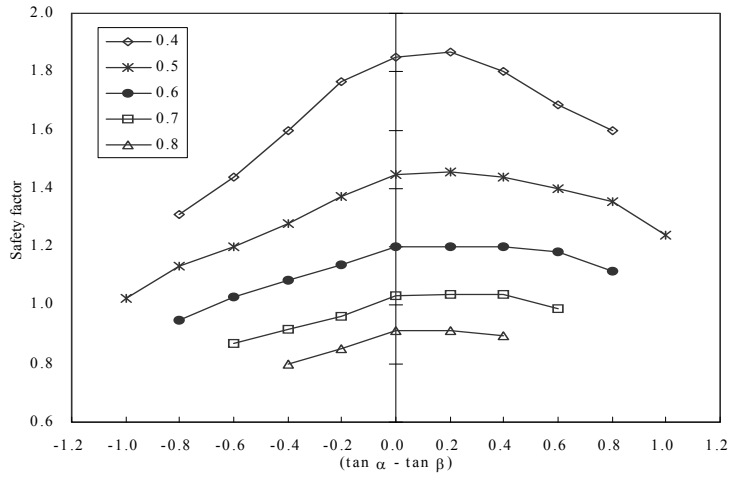
그림 5.56 $\tan \alpha$ 과 $\tan \beta$ 의 안전율 등치선(토심 : 2.0m)

그림 5.56에서 평균 경사도가 동일한 사면들에 대하여 $\tan \alpha$ 가 $\tan \beta$ 보다 작은 블록 사면에서의 안전율이 가장 낮고, 반대인 오목사면의 안전율이 그 다음이며, $\tan \alpha$ 가 $\tan \beta$ 와 같은 평탄사면에서 안전율이 최대가 되는 것으로 나타났다. 이는 토체의 하중과 관련이 있는 것으로 사료된다. 즉, 최급경사도가 동일한 경우에 원호파괴를 가정하면, 블록사면일 때 파괴를 일으키는 토체의 중량이 오목사면에 비해 크게 되므로, 전도 모멘트가 크게 작용하여 안전율이 낮아지게 된다. 평탄사면의 경우에는 평균경사도가 작으므로, 안전율이 크게 된다.

평탄사면, 블록사면, 오목사면의 안전율의 차이를 그림 5.57에 나타내었다. 평탄사면 ($\tan \alpha = \tan \beta$)을 기준으로 블록사면($\tan \alpha < \tan \beta$)은 음의 값으로 표현되고, 오목사면 ($\tan \alpha > \tan \beta$)은 양의 값으로 표현된다. 평균경사도를 0.1에서 0.8(약 40°)까지 변화시키면서 안전율의 변화를 살펴보았다.



(a) $0.1 \leq (\tan \alpha + \tan \beta)/2 \leq 0.3$



(b) $0.4 \leq (\tan \alpha + \tan \beta)/2 \leq 0.8$

그림 5.57 사면 모양에 따른 안전율 변화($\tan \alpha - \tan \beta$)

그림 5.57에서 평균 경사도가 동일하더라도, 원점에서 멀어질수록 즉, $(\tan \alpha - \tan \beta)$ 의 절대값이 커질수록(곡률이 커질수록) 안전율이 감소하였다. 그리고 전체적으로 평균경사도가 증가할수록 안전율 값의 차이는 감소하였다. 또한, 사면의 형태가 대칭인 블록사면과 오목사면의 안전율의 비를 산정한 결과 오목사면의 안전율이 블록사면의 안전율에 비해 평균 24.4% 높게 나타났다. 그림 5.57에 대하여 평탄사면에 대한 블록사면 및 오목사면의 굴곡에 따른 안전율의 비를 그림 5.58에 나타내었다.

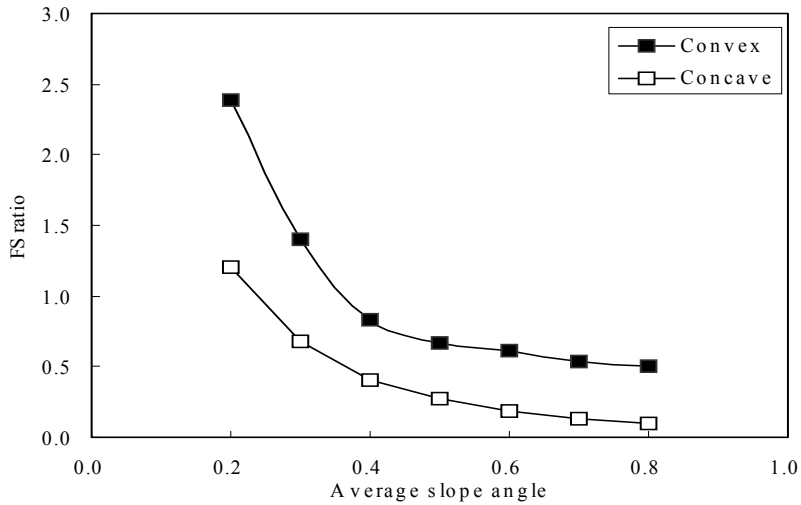


그림 5.55 평균 사면 경사도와 안전율과의 관계

그림 5.55에서 평균 경사도가 증가할수록 감소비는 점차 줄어들었는데, 이는 평균경사도가 작을 때는 굴곡에 따라 안전율의 차이가 크게 발생하지만, 평균경사도가 증가함에 따라 평탄사면의 안전율이 작아지기 때문에 그 차이가 감소하기 때문인 것으로 사료된다.

마. 결론

셀 2개로 이루어진 다중셀 사면에 대하여 두 경사의 \tan 값인 $\tan \alpha$ 및 $\tan \beta$ 를 변화시켜가며 경사도의 변화에 따른 안전율의 변화양상을 살펴본 결과는 다음과 같다.

- ① 경사도에 따른 안전율은 방사형의 모양을 나타냈으며 타원형의 비대칭으로 나타나는 것으로 보아 사면의 형상이 안전율에 영향을 미치는 것으로 사료된다.
- ② $\tan \alpha - \tan \beta$ 의 절대값이 커질수록(곡률이 커질수록) 안전율이 감소하였으며 전체적 평균 경사도가 증가할수록 안전율 값의 차이는 감소하였다.
- ③ 블록사면과 오목사면의 안전율 비를 산정한 결과 오목사면의 안전율이 블록사면의 안전율에 비해 24.4% 높게 산출되었다.
- ④ 블록사면과 오목사면의 안전율 차는 평균경사도가 커짐에 따라 감소하는데 이는 경사도가 증가함에 따라 평탄사면의 안전율 감소에 의한 것으로 사료된다.

4. 결론

본 장에서는 자연사면에서 지형(굴곡)의 변화에 따른 안전율의 변화추이를 이용하여, 자연사면의 안전율과 평균 경사도로 표현한 평탄사면의 안전율을 비교·분석하였으며 다중셀을 이용하여 사면 굴곡이 안전율에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 몇 개의 선정된 지역에 대하여 사면 굴곡을 반영하는 프랙탈 차원(Isarithm Method)과 무한사면안정해석을 통하여 산정된 안전율과의 비교를 통해 그 영향을 평가하고 GIS를 통하여 사면위험성을 도시하였다. 본장의 결과는 다음과 같다.

- ① 자연사면은 크게 블록, 오목, 평탄, 복합사면으로 구분되며, 실제 사면파괴는 평탄사면뿐 아니라, 오목, 블록사면에서 많이 발생하였다. 선정된 연구지역인 양주시 장흥에서 발생한 산사태를 분류한 결과 평탄사면 13개, 오목사면 8개, 블록사면 15개, 복합사면이 14개로 나타났다. 이 분류는 사면의 길이가 길더라도 시작부 40m에 대해서 조사한 것으로서 사면의 전체에 대하여 분류하면 대부분 복합사면에 해당하는 것으로 나타났다. 굴곡량에 따른 평탄사면과 전체사면의 안전율의 비는 굴곡량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.
- ② 경사도에 따른 안전율은 방사형의 모양을 나타냈으며 타원형의 비대칭으로 나타났다. $\tan \alpha - \tan \beta$ 의 절대값이 커질수록(곡률이 커질수록) 안전율이 감소하였으며 전체적 평균 경사도가 증가할수록 안전율 값의 차이는 감소하였다. 블록사면과 오목사면의 안전율 비를 산정한 결과 오목사면의 안전율이 블록사면의 안전율에 비해 24.4% 높게 산출되었다. 블록사면과 오목사면의 안전율 차는 평균 경사도가 커짐에 따라 감소하는 경향으로 나타났다.

제 5 절 비정상 강우를 고려한 강우 침투 시스템 개발

1. 개요

국내의 산지는 대부분이 토심 1~2m 내외의 얇은 사면으로 지하수위의 상승으로 인한 지반내의 간극수압의 증가보다 강우의 침투로 습윤전선이 임계 깊이에 도달하는 것이 사면의 안정에 지배적인 영향을 준다. 즉, 사면의 안정성을 유지하고 있던 지표면에서의 음의 간극수압의 소멸로 인한 강도의 감소가 얇은 사면파괴의 주요 원인인 것으로 알려져 있다(Fredlund et al., 1995; Ng et al., 1998; 김용구, 2006). 따라서 국내의 자연사면에 대한 산사태 위험도 해석을 위해서는 위치별 지하수위의 상승을 정량적으로 모의하는 지표하흐름모델 보다는 강우시 침투량의 정량적인 산정을 통한 습윤전선의 하강을 모의하는 것이 더욱 적합한 모델임을 알 수 있다.

Green-Ampt는 여러 가지 가정을 도입하여 균질 토층에서의 단순화된 침투 모델을 제안하였다. 이 모델은 수많은 연구자들에 의해 적용되고 수정되어 그 타당성과 합리성이 비교적 잘 정립되어 있다. Green-Ampt 모델에 바탕을 둔 일차원 침투 모델인 Mein & Larson 모델은 지반의 함수특성 이력을 기반으로 하고, 지표의 폰딩(Ponding)을 고려하여 침투량을 모의하는 방법이다. 하지만 지표의 폰딩상태 고려에 있어서 강우 강도가 일정한 정상강우(Steady rainfall)를 적용하는 모델로서, 지반침투능과 직접비교되는 강우강도가 실제 분포와는 상이하게 적용된다.

본 절에서는 지반의 최대침투능에 따른 침투량 및 침투깊이의 산정을 위해 Mein & Larson 모델을 사용했고, 정상강우로 모의하였을 때와 실제 강우강도 분포인 비정상강우(Unsteady rainfall)로 모의했을 때의 비교를 수행하였다. 이를 통해 자연사면에서의 보다 합리적인 침투량 산정 결과를 도출하고자 하였고, 이는 역학적 기법의 산사태 안정성 해석에 있어 강우 침투로 인한 영향을 평가하는 데에 중요한 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 재료 및 방법

가. 연구방법

연구 대상지역을 선정 후 현장계측 및 실내시험을 통하여 데이터를 수집하였다. 그리고 대상지역의 강우자료를 수집하여 계측 및 실험 자료와 함께 Mein & Larson 모델과 수정된 Mein & Larson 모델에 각각 적용하여 해석하여 비교하였다. 수정된 Mein & Larson 모델은 현장 함수비센서로 계측한 값을 통해 검증하였다.

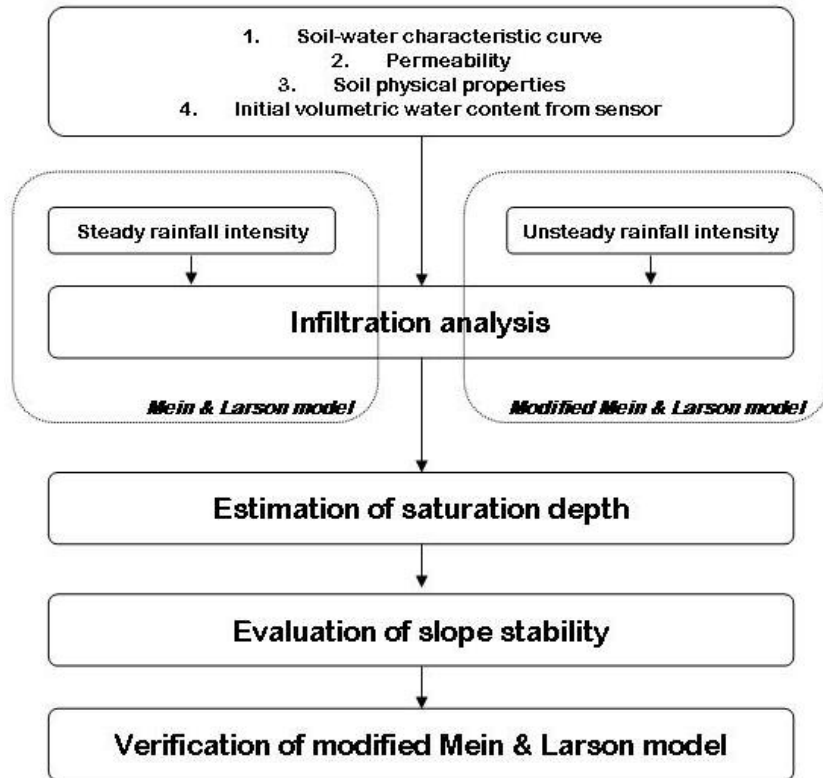


그림 5.59 연구흐름도

나. 현장계측

현장 데이터는 본 연구의 제4장에서 언급하였던 계속적으로 모니터링을 실시한 경기도 양주군 장흥 현장의 계측자료를 사용하였다.

다. 실내시험

지반의 기본적인 물리적 특성과 포화투수계수를 구하기 위해 센서 매설지점에서 Box sampler를 이용하여 시료를 채취하였다. 기초물성시험 및 투수시험은 한국산업규격(KSF)에 명시된 시험방법에 의거하여 수행하였으며, 투수시험은 정수두 투수시험을 실시하였다. 또한 침투해석의 모델변수를 산정하고 불포화전단강도를 예측하기 위해 함수특성시험을 수행하였다. 시험시 공기함입치는 1000kp이다.

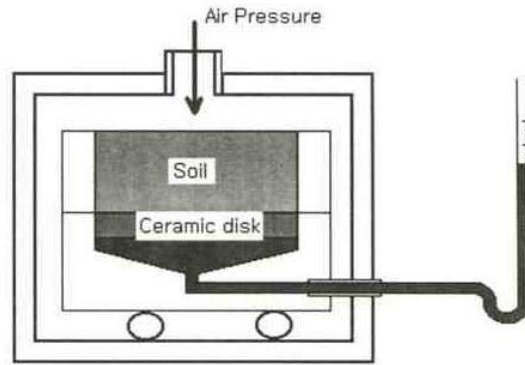


그림 5.60 불포화 진단장도 시험기구 개략도

라. 강우자료

본 연구에서는 TM좌표로 $x=204092.3649$, $y=471265.4425$ 에 위치하는 의정부 기상관측소의 시우량 자료를 사용하였다. 의정부 기상관측소는 건설교통부 관할관측소로 연구지역 대상사면과의 직선거리가 약 5km 정도이다. 강우자료는 2006년 여름 집중호우시 내렸던 강우사상 중에 2006년 7월 12일, 15일, 27일에 있었던 세 가지 사상을 선정하여 해석에 적용하였으며, 각각 Case 1, 2, 3으로 명기하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 현장조건 및 모델변수 산정

1) 지반조건

표 5.23은 연구 대상지에서 채취한 시료의 물성시험 결과로 비중은 약 2.62이며 통일분류법으로 SC에 해당되었다.

또한 불포화 지반의 함수특성 및 침투모델의 변수를 산정하기 위해 Box sampler를 이용하여 불교란 시료를 채취하였고, 이에 대해 함수특성시험을 실시하였다. 함수특성시험 결과를 이용하여 van Genuchten이 제안한 함수특성곡선(SWCC)식의 맞춤변수를 산정하였으며, 이를 이용하여 습윤전선(wetting front)에서의 모관흡수력을 산정하였다. 표 5.24는 그 결과이다.

표 5.23 시료의 물성치

G_s	K_s (cm/s)	γ_d (kN/m ³)	Porosity(%)	PI(%)	USCS
2.62	1.92×10 ⁻⁴	14.857	42.12	15.66	SC

표 5.24 SWCC의 변수와 모관흡수력

fitting parameters of van Genuchten's SWCC			ψ_{mf} (cm)
α	m	n	
0.02905	0.3426	1.532	81.618

2) 강우조건

Mein & Larson 모델과 수정된 Mein & Larson 모델의 침투해석을 위해 2006년 여름 집중호우시 내렸던 강우사상 중에 세 가지 사상을 선정하였다. 각각 Case 1, Case 2, Case 3이라 하였고, 이는 표 5.25, 표 5.26, 표 5.27과 같다.

표 5.25 강우사상 Case 1

Date	Rainfall intensity (mm/hr)
2006/7/12 04'	4
" 05'	23
" 06'	18
" 07'	19
" 08'	17
" 09'	33
" 10'	43
" 11'	29
" 12'	44
" 13'	16
" 14'	4
" 15'	25
" 16'	39
" 17'	1
" 18'	1
" 19'	2
" 20'	1
" 21'	1
Cumulative rainfall	320

표 5.26 강우사상 Case 2

Date	Rainfall intensity (mm/hr)
2006/7/15 24'	15
2006/7/16 01'	48
" 02'	5
" 03'	7
" 04'	7
" 05'	5
" 06'	1
" 07'	2
" 08'	5
" 09'	5
" 10'	6
" 11'	5
" 12'	5
" 13'	9
" 14'	3
" 15'	1
" 16'	1
Cumulative rainfall	130

표 5.27 강우사상 Case 3

Date	Rainfall intensity (mm/hr)
2006/7/27 07'	1
" 08'	13
" 09'	18
" 10'	11
" 11'	6
" 12'	7
" 13'	4
" 14'	12
" 15'	15
" 16'	18
" 17'	1
" 18'	1
" 19'	3
" 20'	7
" 21'	4
" 22'	2
Cumulative rainfall	123

3) 모델변수 산정

침투해석을 위해서는 대상지역 시료에 대한 습윤전선에서의 모관흡수력 값이 필요하다. Morel-Seytoux 등(1996)은 van Genuchten의 함수특성곡선을 이용하여 습윤전선에서의 모관흡수력을 다음과 같이 제안하였다.

$$\psi_{mf} = \frac{0.046m + 2.07m^2 + 19.5m^3}{\alpha(1 + 4.7m + 16m^2)} \quad (5.126)$$

여기서, ψ_{mf} : 습윤전선에서의 모관흡수력(kPa)

α, m : van Genuchten의 함수특성곡선식의 맞춤 변수

각 강우사상에 대한 초기체적함수비(θ_o)는 강우시작 시간의 현장함수비센서 계측값을 사용하였고, 포화체적함수비(θ_s)는 대상지역의 공극률(porosity) 값을 적용하였다. 이는 표 5.28과 같다.

표 5.28 침투 계산에서 초기조건

	θ_o (%)	θ_s (%)	ψ_{mf} (cm)	K_s (cm/s)
Case 1	27.87	42.12	81.618	1.92×10^{-4}
Case 2	26.38			
Case 3	22.23			

4) 해석사면

해석사면은 연구대상지역의 사면에서 체적함수비센서가 매설된 부분을 무한사면으로 가정하고 설정하였다. 경사는 체적함수비센서가 매설된 부분의 평균경사인 16°로 가정하였고, 물성값 및 강도정수는 대상사면에서 채취한 시료의 실험값을 적용하였다.

표 5.29 경사면 조건

	θ_o (%)	γ_t (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	slope angle (°)	soil depth (m)	fitting parameters		
								α	m	n
Case 1	27.87	17.593	18.989	9	15.6	16	2.10	0.02905	0.3426	1.532
Case 2	26.38	17.446								
Case 3	22.23	17.040								

나. 침투해석 결과

Case 1, 2, 3에 걸쳐 Mein & Larson 모델과 수정된 Mein & Larson 모델에 대한 침투해석을 각각 수행하였다. 이에 대한 결과를 그래프로 도시하였고 두 모델간의 차이를

비교하였다. 또한 수정된 Mein & Larson 모델을 현장함수비 계측값을 통해 검증하였다.

1) Case 1 (2006년 7월 12일)

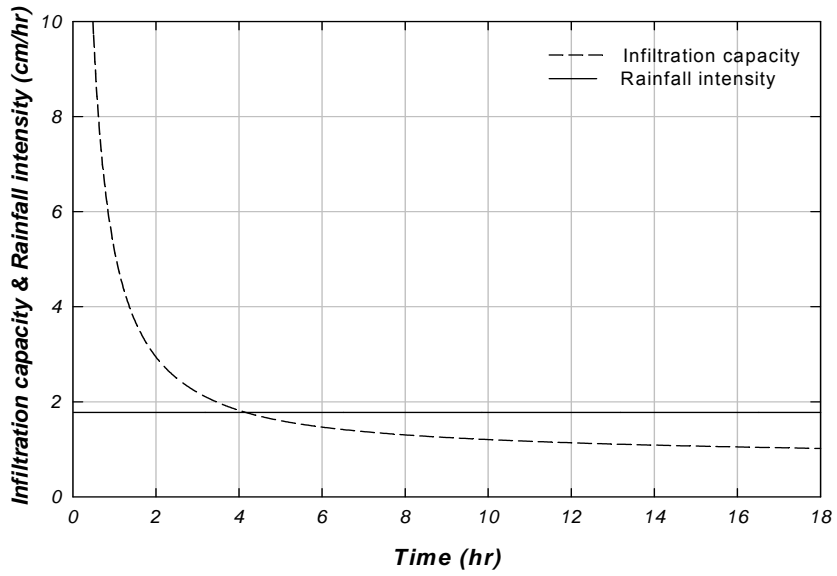
그림 5.61(a)와 (b)는 각각 정상강우와 비정상강우를 적용하였을 때의 침투능과 강우 강도에 대한 그래프이다. 폰딩량과 폰딩시간이 크게 차이나고 있음을 쉽게 확인할 수 있다.

강우초기 첫 번째 폰딩시간까지의 강우량이 비정상강우적용시가 더 적다. 때문에 그림 5.61(c)에서 수정된 Mein & Larson 모델의 침투능 감쇠가 더 늦게 진행되는 것으로 나타났다. 이는 그림 5.61(d)에서 수정된 Mein & Larson 모델의 포화깊이가 일정 깊이에 도달하는데 Mein & Larson 모델보다 30분 가량 늦는 것으로 반영되었다.

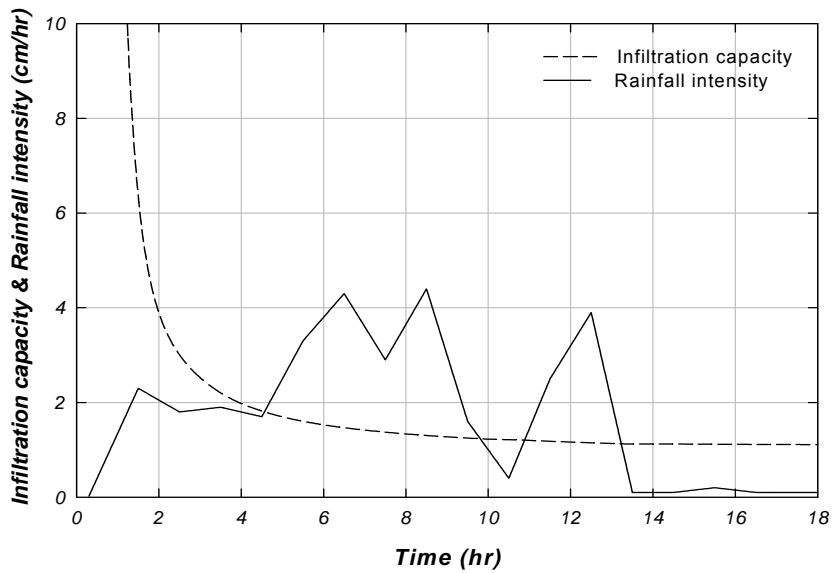
모의시간으로 5~13시에 해당되는 강우 중반부 구간에서는 두 모델의 폰딩량이 큰 차이를 보이지만, 두 모델 공통적으로 폰딩이 발생하고 있기 때문에 지반에 반영되는 침투량은 큰 차이를 보이지 않는다. 때문에 그림. 5.61(d)의 포화깊이 역시 수정된 Mein & Larson 모델이 30분 지연된 상태의 진행 양상을 계속 보였다.

모의시간으로 13시 이후의 강우 후반부에서는 실제 강우량이 급감한다. 때문에 그림. 5.61 (a), (b)에서 침투량의 차이를 쉽게 확인할 수 있으며, 이는 수정된 Mein & Larson 모델의 포화깊이 증가율이 급감하는 것으로 그림 5.58(d)에서 나타났다. 결국 강우종료시 최종 침투깊이의 차이가 대략 50cm 정도로 나타났다.

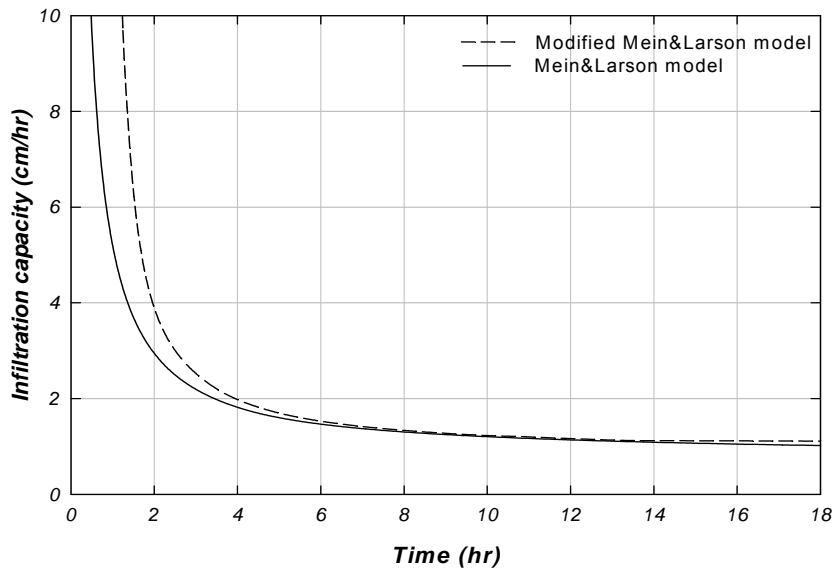
그림 5.61(e)에는 모의시간에 대한 포화깊이로 사면의 안전율(Safety factor)을 산정한 결과를 도시했다. 안전율 값이 '1' 이하로 내려가는 시간은 Mein & Larson 모델이 더 빠르게 나타났으며, 강우종료시 최종 안전율 값을 수정된 Mein & Larson 모델이 더 크게 나타냈다.



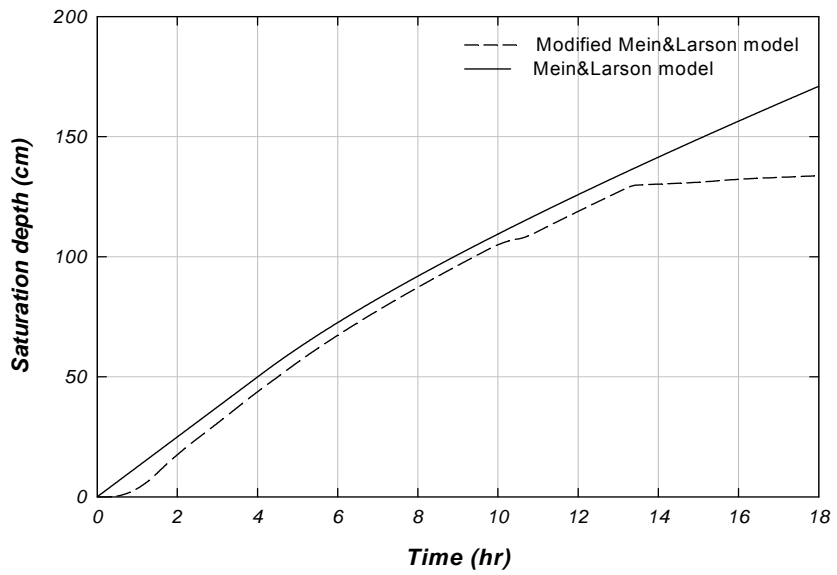
(a) Mein & Larson model에 의한 침투 곡선(정상강우)



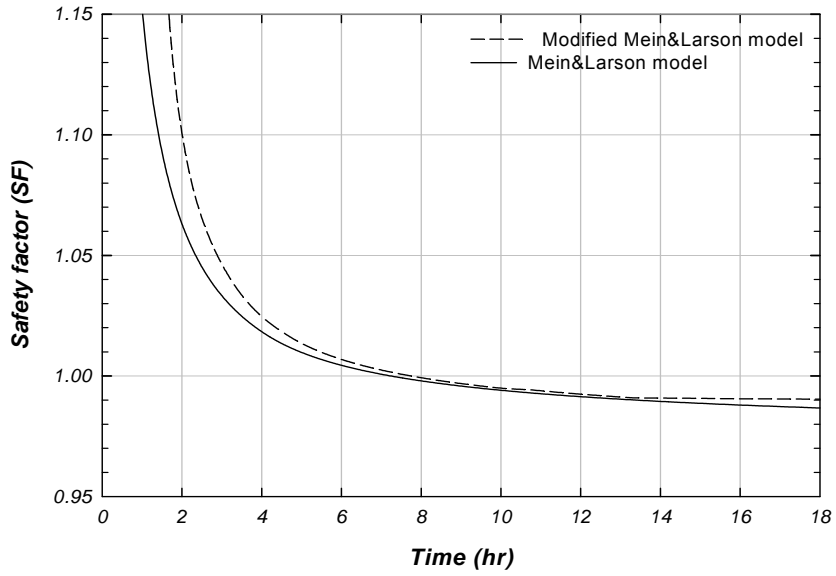
(b) Modified Mein & Larson model에 의한 침투곡선 (비정상강우)



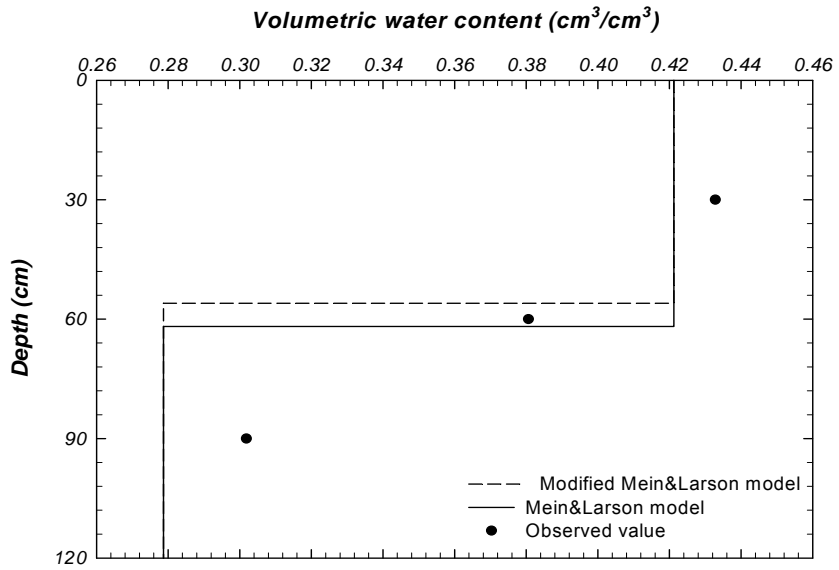
(c) 침투능 비교



(d) 포화깊이 비교



(e) 안전율 비교



(f) Modified Mein & Larson model의 검증 (5시간 경과 후)

그림 5.61 Case 1 해석결과

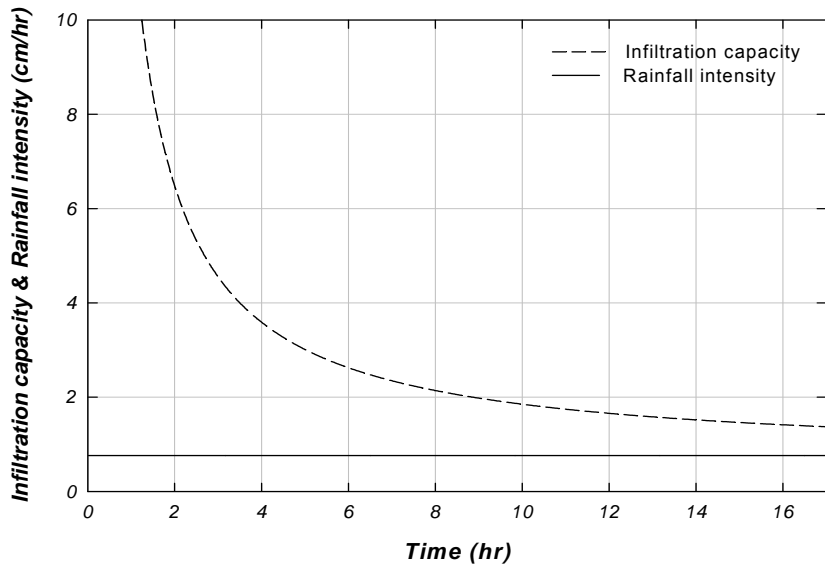
수정된 Mein & Larson 모델의 검증을 위해 함수비센서가 매설되어 있는 심도 60cm 근처에서 포화깊이가 형성되는 모의시간 5시를 선택하였다. Fig. 5.58(f)는 두 모델의 포화깊이와 센서 계측값을 도시한 그래프이다. 모의시간 5시의 경우 Mein & Larson 모델의 포화깊이는 60cm를 넘어섰지만, 수정된 Mein & Larson 모델의 포화깊이는 60cm에 미치지 못했다. 60cm 깊이 함수비센서의 계측값이 포화체적함수비에 미치지 못한 것으로 보아 수정된 Mein & Larson 모델이 계측값에 더 근접함을 확인하였다.

2) Case 2 (2006년 7월 15일)

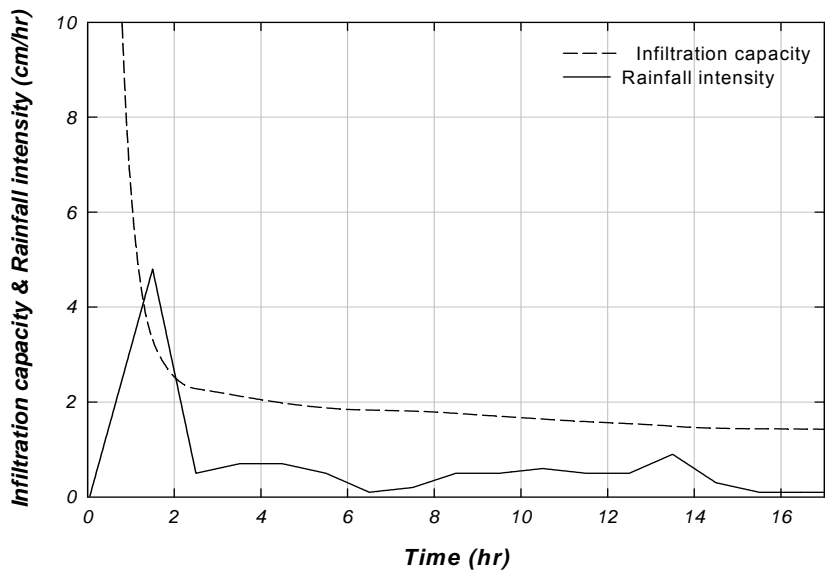
Case 2는 강우 초반부에 강우량이 집중되는 경우이다. 때문에 그림 5.62(c)에서 수정된 Mein & Larson 모델의 초반 침투능 감쇠가 매우 급격한 것으로 나타났다. 이는 그림 5.62(d)의 포화깊이에도 나타나는데, 포화깊이가 40cm에 도달하는데 걸리는 시간이 수정된 Mein & Larson 모델이 Mein & Larson 모델보다 대략 4시간이나 빠른 것으로 나타났다.

그림 5.62(d)에서 강우 후반부의 침투깊이 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 Case 2의 폰딩량 자체가 크지 않기 때문이다. 그림 5.62(a)의 경우 폰딩이 일어나지 않는데 반면 그림 5.62(b)의 경우 초반 강우의 집중으로 폰딩이 발생하기 되고 결국 그 차이가 최종 포화깊이에 반영된 것임을 확인하였다.

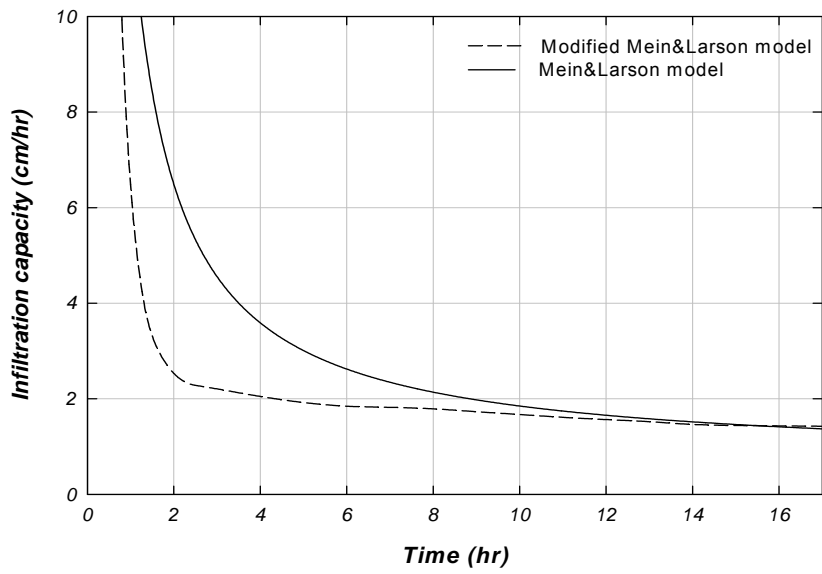
그림 5.62(e)에서 수정된 Mein & Larson 모델의 안전율 값이 강우발생후 2시간 동안 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 강우종료후 최종 안전율 값은 두 모델의 값이 비슷한 것으로 나타났다.



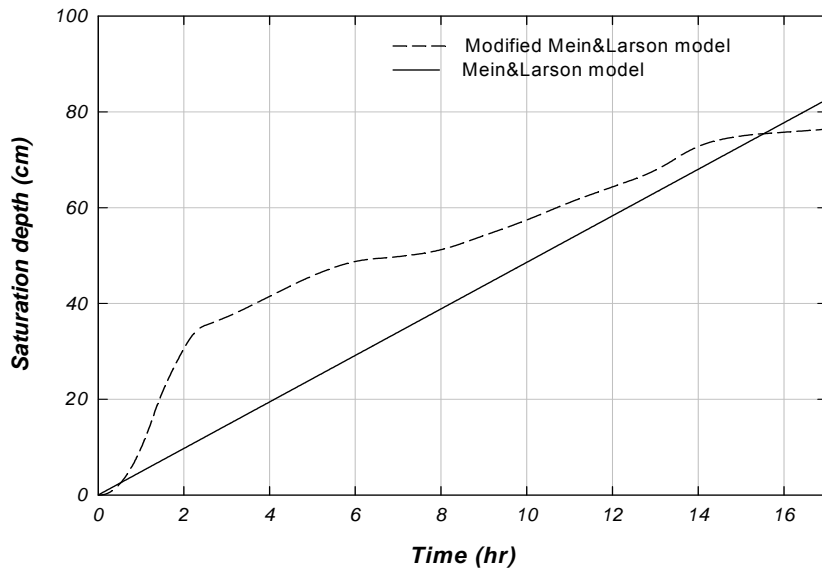
(a) Mein & Larson model에 의한 침투곡선 (정상강우)



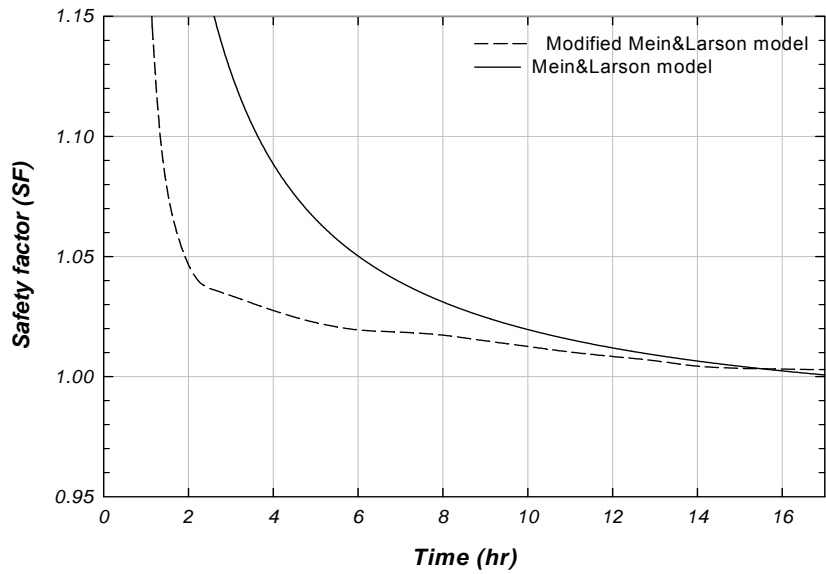
(b) Modified Mein & Larson model에 의한 침투곡선 (비정상강우)



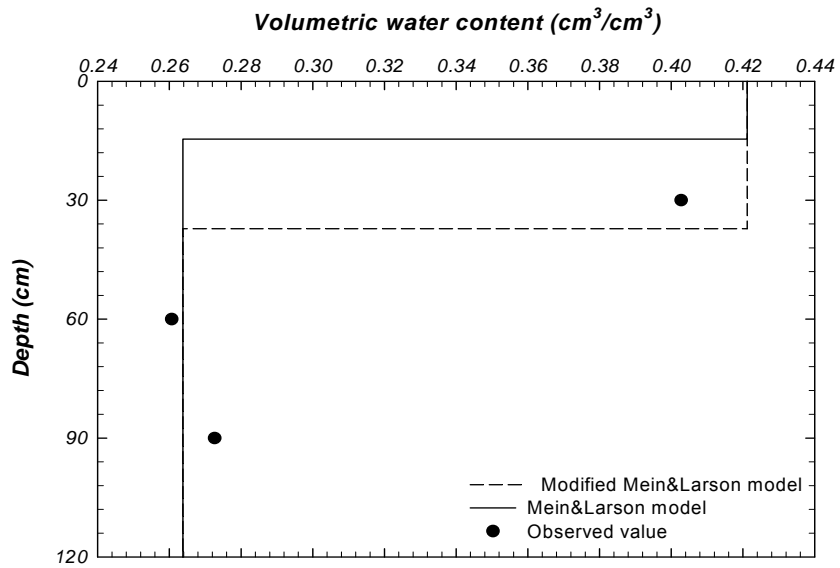
(C) 침투능 비교



(d) 포화깊이 비교



(e) 안전율 비교



(f) Modified Mein & Larson model 검증(3시간 경과 후)

그림 5.59 Case 2 해석결과

Case 2에서는 검증을 위해 포화깊이가 가장 큰 차이를 보이는 모의시간 3시를 선택하였다. 수정된 Mein & Larson 모델의 포화깊이가 30cm를 넘어섰고, 30cm 깊이의 함수비센서 계측값이 포화체적함수비에 거의 근접한 것으로 나타났다.

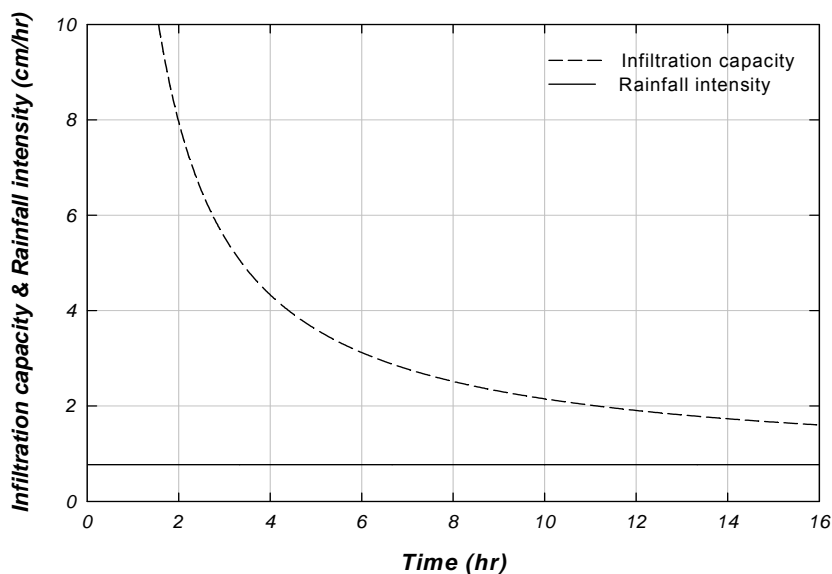
3) Case 3 (2006년 7월 27일)

Case 3은 그림 5.60(a), (b)을 보면 두 모델 모두 폰딩이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 즉, 최종침투 깊이는 동일하게 되고, 이는 그림 5.60(d)에 나타났다.

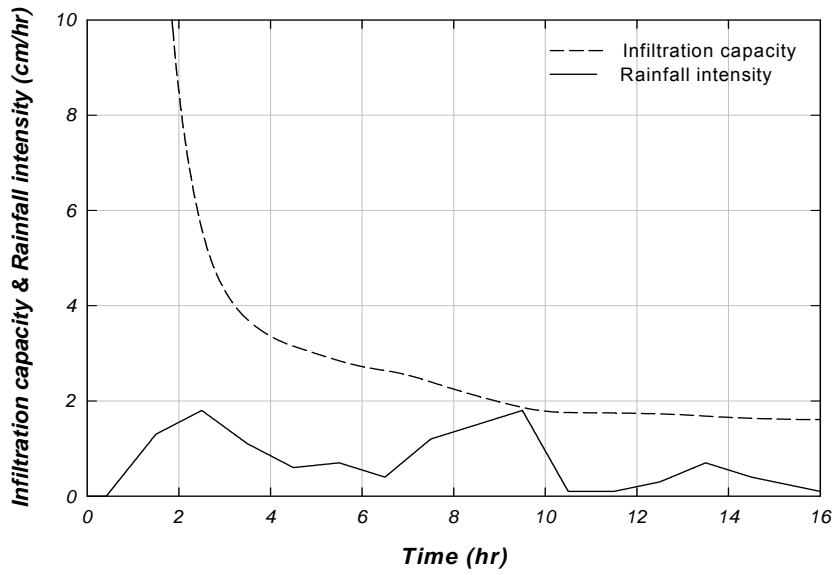
하지만 그림 5.60(a), (b)에 실선으로 표시된 강우강도를 비교하면 비정상강우적용시의 시간강우강도가 정상강우적용시의 시간강우강도를 넘나들고 있고, 이는 그림 5.3(c)의 침투능 결과에도 잘 나타나 있다.

그림 5.60(d)의 포화깊이 결과 역시 그림 5.60(c)의 침투능과 비슷한 시간인 모의시간 2시경에 교차되는 것으로 나타났다. 또한 침투깊이 50cm에 도달하는 시간은 수정된 Mein & Larson 모델이 Mein & Larson 모델보다 4시간 가량 빠른 것으로 나타났다.

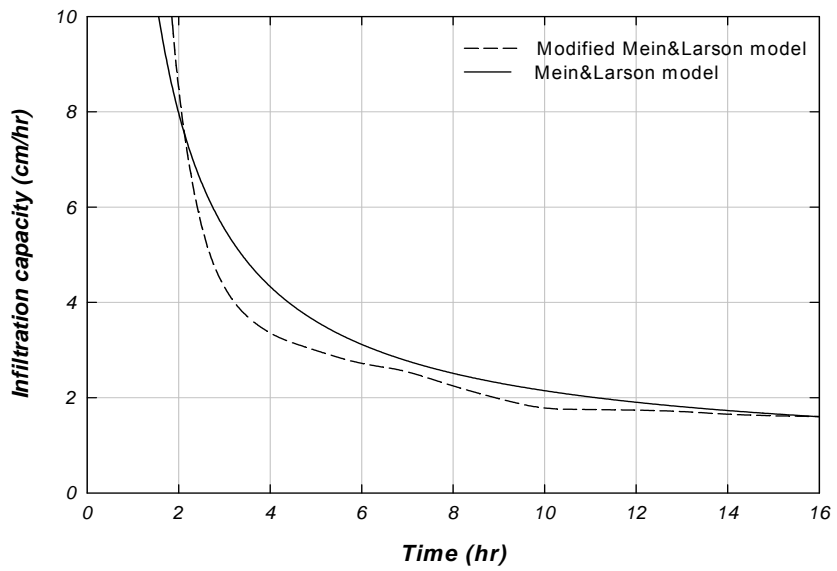
두 모델의 최종포화깊이가 같기 때문에 그림. 5.60(e)에서 강우종료후 최종안전율 값 역시 같은 값으로 산정되었다. 하지만 모의시간에 따른 안전율 값을 상이하게 산정된 포화깊이 결과가 반영된 것으로 나타났다.



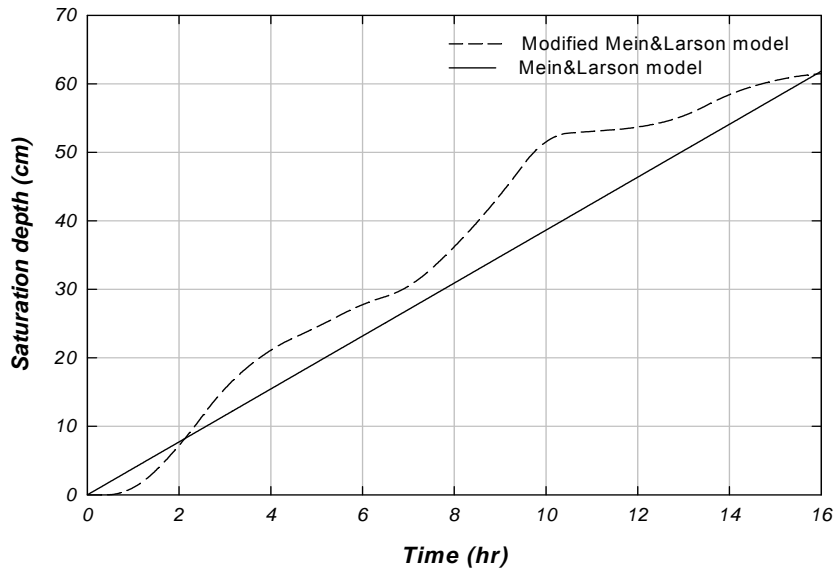
(a) Mein & Larson model에 의한 침투곡선 (정상강우)



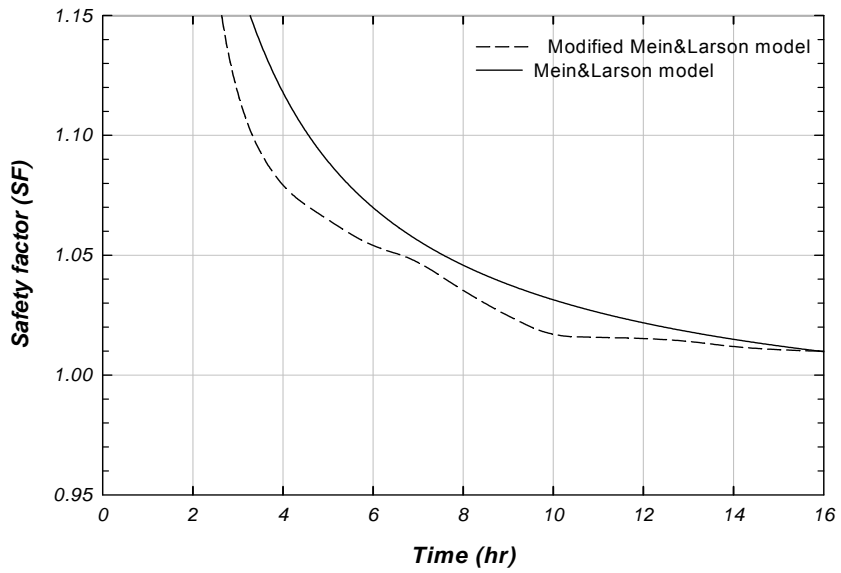
(b) Modified Mein & Larson model에 의한 침투곡선 (비정상강우)



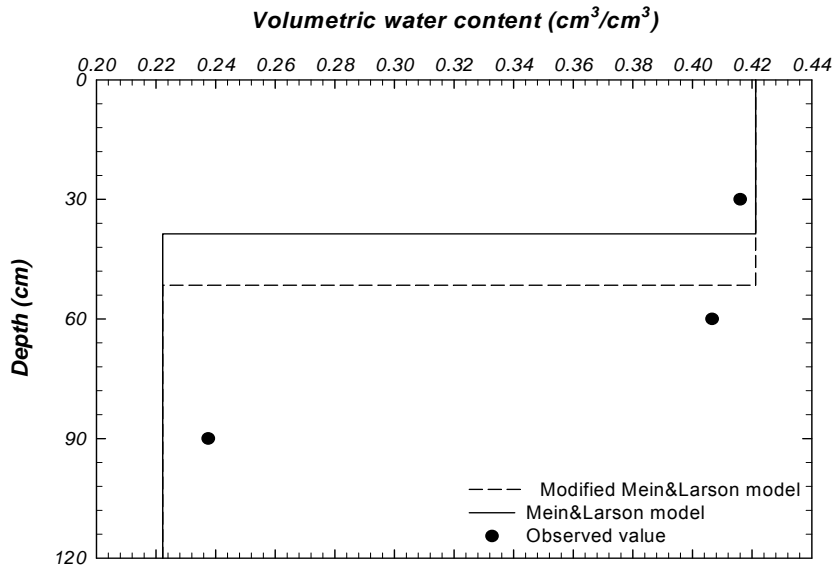
(c) 침투능 비교



(d) 포화깊이 비교



(e) 안전율 비교



(e) Modified Mein & Larson model의 검증(10시간 경과 후)

그림 5.60 Case 3 해석결과

Case 3에서는 검증을 위해 포화깊이의 차이가 가장 큰 모의시간 10시를 선택하였다. 수정된 Mein & Larson 모델의 포화깊이가 60cm에 근접한 것으로 나타났고, 60cm 깊이의 함수비센서 계측값이 포화체적함수비에 근접한 것으로 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 역학적 기법의 산사태 위험성 해석을 위한 강우침투 모델로 Mein & Larson 모델을 선택하였고, 비정상강우의 적용으로 Mein & Larson 모델을 수정하여 지반의 최대침투능에 따른 침투량 및 침투깊이를 산정하고 두 모델에 대한 비교를 수행하였다. 이를 통해 자연사면에서의 보다 합리적인 침투량 산정 결과를 도출하였고, 이는 강우침투해석을 통한 역학적 기법의 산사태 위험도 해석을 위한 좋은 기초자료가 될 것으로 생각한다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 총 강우량은 같아도 정상강우와 비정상강우의 차이에 의해 폰딩량과 폰딩구간이 달라졌다. 폰딩량의 차이는 강우 종료 후 최종포화깊이의 차이에 반영이 되었으

며, 침투능이 크게 감소한 경우의 중반부 이후에 많은 강우량이 집중되는 Case 1 과 같은 경우에 그 차이가 크게 나타났다.

- ② 강우의 초반부에 강우량이 집중되는 Case 2의 경우 수정된 Mein & Larson 모델의 습윤전선 하강이 최대 4시간까지 빠르게 진행되는 것으로 나타났다. 진행된 포화깊이가 해당사면의 임계깊이와 가까울수록 이러한 해석은 큰 의미를 가질 것으로 생각된다.
- ③ 두 모델은 폰딩이 일어나지 않는 Case 3의 경우에도 시간대에 따라 침투되는 양이 다르기 때문에 같은 포화깊이에 도달하는 시간도 각각 다르게 나타났다.
- ④ 각 경우에서 시간에 따른 안전율 변화의 양상은 산정된 포화깊이의 결과가 잘 반영된 것으로 나타났다. 즉, 비정상강우 적용에 의해 침투량이 급격하게 증가하는 시간에 사면의 안전율도 빠른 속도로 감소하는 결과를 확인할 수 있었다.
- ⑤ 결과적으로, 기존의 Mein & Larson 모델은 폰딩이 발생하기 시작하는 시간과 그때까지의 누적침투량에 집중하는 모델이었다면, 수정된 Mein & Larson 모델은 단순 폰딩량이나 침투량보다 침투량이 급격히 증가하게 되는 구간을 찾아낼 수 있는, 즉 시간변수의 의미가 강화된 모델이라고 할 수 있다.

제 6 절 지표하 흐름을 고려한 자연사면 위험성 해석 기법 개발

1. 개요

강우는 물리·역학적으로 산사태 발생 원인을 연구함에 있어서 산사태를 발생시키는 결정적인 인자이다. 그래서 많은 연구자들은 강우와 산악지역 수문과의 관계 그리고 강우와 지형과의 관계에서 산사태 발생의 원인을 연구하고, 그에 따르는 모델을 개발 시켜왔다. 그에 따라 정확한 수문 모델의 필요성이 커지게 되었지만 광역적인 산사태 위험도를 판정한다는 것은, '최소한의 데이터로 정밀한 사면안정진단을 필요로 하는 위험지역을 찾는 것(Terrain stability mapping practice in British Columbia, 1995)'을 목적으로 하기 때문에 모델의 구성이 간단하고 이용이 간편해야 한다는 것을 전제로 하고 있다. 따라서 초기의 모델들은 정상강우를 가정하고 있으며, 임의의 점에 대한 기여면적의 모든 우량은 그 점을 통해 유출 되었다고 가정함으로써 산사태 위험지 예측의 간편성을 최대한 유지하고 있지만 상기한 가정들로 인해서 실제 강우현상인 비정상강우를 반영하지 못하고, 시간의 경과에 따른 재충전율을 고려하지 못하기 때문에 지표하흐름의 분포를 파악하는데 있어서 한계를 내포하고 있다.

따라서 본 절에서는 경기도 장흥의 연구지역에서 획득한 수문자료와 지반정수들을 바탕으로 비정상강우에 대하여 침투해석을 하여 동역학모델의 기여우량을 산정하며 동역학적 습윤지수를 구하는 Barling 등(1994)의 모델에 기여면적이 아닌 우량의 개념을 적용하여 습윤지수를 모의·검증한다. 또한 동역학 모델에 의해서 산정된 습윤지수를 이용하여 산사태 위험지를 예측하고자한다.

2. 모델의 구성

동역학 모델을 구성하고 모의하기 위한 흐름도는 그림 5.64와 같다. 수문자료와 지형 자료로부터 기초자료를 구축하고 침투해석으로 기여우량을 산정하였다. 산정된 기여우량은 동역학 모델을 모의하는 입력변수로 사용되며, 경사도 및 투수계수와 함께 지표하 흐름량을 결정짓는 영향인자이다. 지표하흐름량을 바탕으로 모의된 습윤지수를 구하고 사면안정해석을 수행한다.

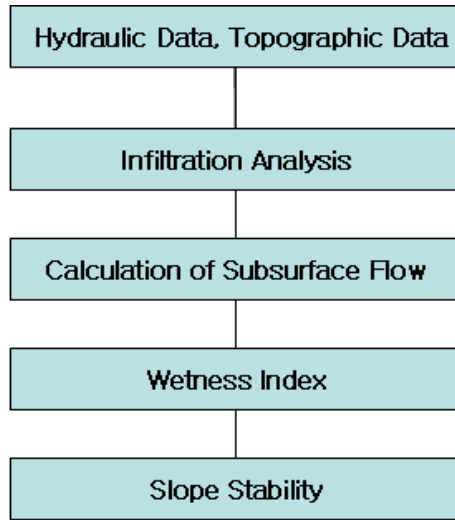


그림 5.64 모델의 흐름도

가. 침투해석

지표하흐름에 기여하는 우량을 산정하기 위하여 Green-Ampt Mein-Larson(GAML) 모델(Mein & Larson, 1973)을 사용하여 침투해석을 하고 침투량을 초과하는 우량은 지표유출로 기여우량에서 제외하였다.

나. 토심추정 모형

토심에 영향을 주는 인자로는 사면경사, 표고, 굴곡, 지질조건 등이 있다. 이들 인자들을 고려하여 토층의 두께를 산정해야하지만, 광범위한 지역에 대한 상세한 조사가 필요하므로 많은 비용이 소요된다. 그러므로 여러 연구자들은 토심을 추정하기 위한 방법들을 제시하였다(Park, et al. 2001; Iida, 1999; USGS).

국내에서는 이사로(2000), 황석훈(2001) 및 이승기(2001) 등이 토양도에서의 유효토심을 실제토양의 두께로 판단하였다. 김영삼(2002)은 C층까지의 깊이를 토심으로 판단하고, 경사위치를 이용하여, 2/10부 능선까지는 토심이 101cm 이상, 3/10~9/10부 능선까지는 토심이 20~100cm 그리고 9/10부 능선이상은 토심이 20cm이하로 추정하였다.

표 5.30 경사도에 따른 토심 깊이(San Francisco beach, USGS)

Slope angle(degree, °)	Depth of soil cover (m)
0~30	2.0
30~40	1.5
40~60	1.0
>60	0.5

USGS에서는 사면의 경사도에 따라 Table 5.30과 같이 제안하였다. 토심을 경사도에 대한 식으로 표현하면 식(5.127)과 같다.

$$D_{soil} = 2.5 - 1.5 \frac{\tan\theta}{\tan 60^\circ} \quad (if \theta < 70^\circ) \quad (5.127)$$

여기서, D_{soil} : 토심[L] , θ : 사면경사(°)

토심의 범위는 0~2.5m이며, 70°이상에서는 토양층이 존재하지 않는다고 가정한다. 산정부근에서는 경사도가 10°미만인 지역이 나올 수 있지만, 9부능선 이상에서는 토심이 20cm이하인 것으로 가정하였다.

본 연구에서는 토심에 영향을 주는 인자 가운데서 사면의 경사도를 가장 큰 영향인자로 보고 식(5.127)을 이용하여 토심을 추정하고자 한다.

다. 운동파방정식에 의한 지표하흐름량 계산

Barling 등(1994)은 반동역학적 습윤지수를 구하기 위해서 Beven(1981)의 지표하흐름에 대한 운동파방정식을 이용하였다. 그리고 Borga 등(2002)이 반동역학적 습윤지수를 이용하여 강우강도에 대한 사면의 민감도를 구할 때, 흐름의 발생 깊이를 불수투층인 기반암으로 가정하고 포화 깊이를 산정하였다. 따라서 본 논문에서도 지표하흐름의 발생 깊이를 기반암으로 가정하고 운동파방정식에 의하여 지표하흐름량을 계산한다.

Grid-based GIS에서 지표하흐름량을 계산하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 식(3.20)을 이용하여 각 셀들을 통과할 수 있는 시간들을 산정하고, 식(3.29)를 이용하여 배수시간의 경과와 함께 각 셀의 우량을 계산함으로써 기여우량을 산정하는 알고리즘이다. 이때, 각 셀에서 산정된 우량으로 식(3.30)의 포화깊이를 산정한다.

지표하흐름의 기본 가정은 다음과 같다.

- ① 흐름은 Darcy's law를 따른다.
- ② 임의의 점에서의 동수경사는 기반암의 경사와 동일하다.
- ③ 지표하 흐름은 지형의 경사에 따라서 흐른다.
- ④ 전 토층은 충분히 습윤하다
- ⑤ 균일한 침투율을 가진다

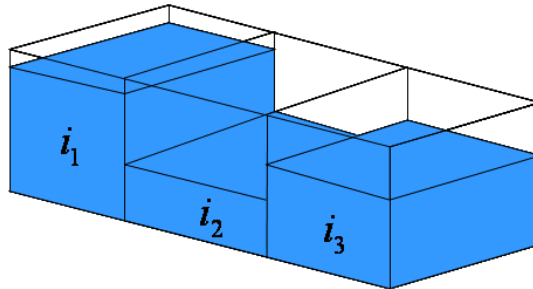


그림 5.65 흐름 분포에 대한 개략도

그림 5.65는 각 셀의 경사가 다르다고 가정할 때 기여우량의 차이를 보여준다. 각 셀에서 기여우량을 산정하는 방법은 다음과 같다.

- ① 셀(i_2)에서 배수된 시간과 흐름을 형성시키도록 주어진 시간을 비교한다.
- ② 셀에서 배수된 시간이 흐름을 형성시키도록 주어진 시간에 도달하지 못하였다면 즉, i_2 의 우량이 모두 i_3 로 배수 되지 않았다면 i_2 의 우량을 흐름이 형성되도록 주어진 시간의 분율 만큼 i_3 셀에 대한 기여우량으로 한다.
- ③ 셀(i_2)이 모두 배수되었다면 현재 셀(i_2)은 새로운 우량이 i_1 셀로부터 유입되기 때문에 i_2 셀이 완전 배수된 시간에 맞춰서 우량 $q_1 + \Delta q$ 를 새로이 계산하고 i_2 셀에 대한 기여우량으로 한다.

위의 계산알고리즘에 대한 흐름도는 그림 5.66과 같고, 계산 예는 아래와 같다.

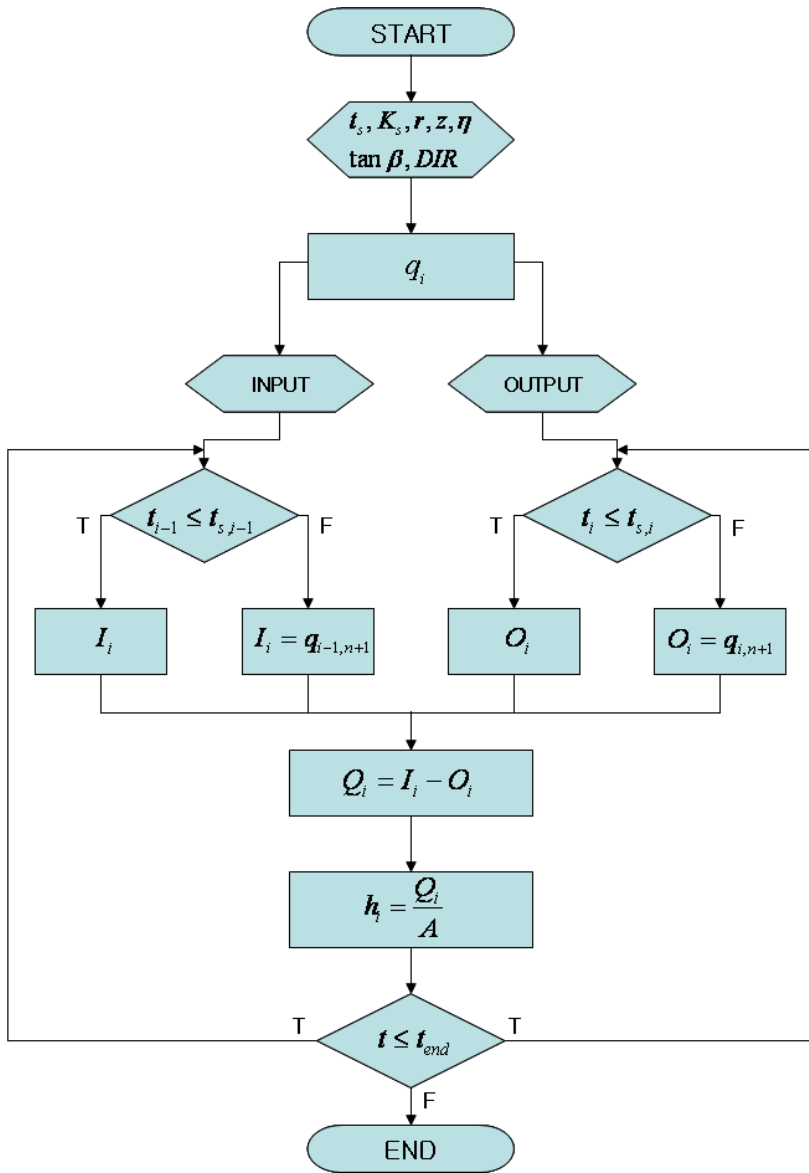


그림 5.66 계산 알고리즘에 대한 흐름도

우량을 산정하는 식은 다음과 같다.

① 각 셀을 통과하는데 소요되는 시간

$$t_{s,i} = \frac{\text{cell size}}{v_i} = \frac{\eta}{K \tan \beta} (\text{cell size}) \quad (5.128)$$

v_i 는 i 번 셀에서 식(3.20)을 이용하여 구한 유속이다.

② 각 셀에서의 Input량과 Output량

$$I_i = \frac{q_{i-1}}{t_{s,i-1}} \times t \quad O_i = \frac{q_i}{t_{s,i}} \times t \quad (5.129)$$

q_i 는 식(3.29)로 계산한다.

③ 각 셀에서의 우량

$$Q_i = I_i - O_i \quad (5.130)$$

④ 각 셀에서 변화된 우량 계산

$$q_{i,n+1} = q_{i,n} + \Delta q \quad (5.131)$$

$$\Delta q = q_{i-1} - q_i \quad (5.132)$$

여기서 t : 배수시간, i : 셀 번호, t_s : 셀을 흐르는데 걸리는 시간

q : 기여우량, I : 배수시간 t 에 대한 상부 셀의 기여우량,

O : 배수시간 t 에 대한 하부 셀로의 기여우량, K : 포화투수계수

위와 같은 계산과정을 각 셀에서 시간단위로 계산하면, 현재의 셀에서 얼마의 양이 배수되었는지 알 수 있으며 배수 되는 시간에 따라서 흐름을 추적하였을 때 흐름이 현재의 셀을 통과하였다면, 새로운 $q_{i,n+1}$ 를 구해서 다음 셀에 기여하는 양으로 재설정하게 된다.

위 알고리즘에 따른 계산 예는 아래와 같다.

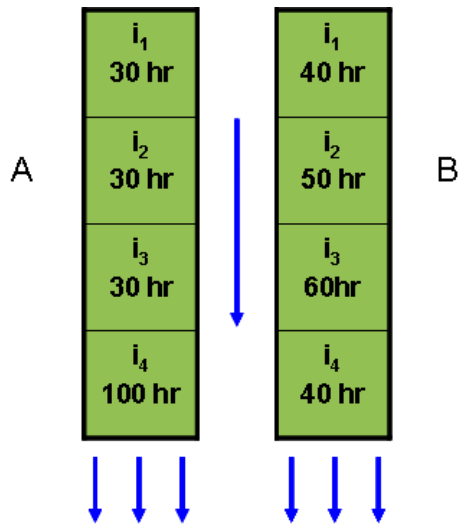


그림 5.67 흐름에 대한 개략도

그림 5.67에서 A와 B의 셀들이 동일한 투수계수 $K=0.007(m/hr)$, 동일한 공극률 $\eta=47\%$, 동일한 셀 크기 $A=25(m^2)$ 이고, 기여우량이 각 셀마다 $2(m^3)$ 로 동일하다고 할 때, 각 셀의 경사도는 표 5.30과 같고, 각 셀을 통과하는데 소요되는 시간은 식 (5.128)에 따라서 구하여진다.

표 5.31 각 셀의 경사도

A Cell number	$\tan \beta$	B Cell number	$\tan \beta$
i_1	55.95	i_1	41.96
i_2	55.95	i_2	33.57
i_3	55.95	i_3	27.98
i_4	16.79	i_4	41.96

식(4.22)에 따라서 각 셀에 기여하는 유입량과 유출량을 구하면 표 5.32, 표 5.33과 같다.

표 5.32 A 셀에서의 Input과 Output

경과 시간		1(hr)	2(hr)	3(hr)
I_i	i_1	0	0	0
	i_2	0.06667	0.06667	0.06667
	i_3	0.06667	0.06667	0.06667
	i_4	0.06667	0.06667	0.06667
O_i	i_1	0.06667	0.06667	0.06667
	i_2	0.06667	0.06667	0.06667
	i_3	0.06667	0.06667	0.06667
	i_4	0.02	0.02	0.02

표 5.33 B 셀에서의 Input과 Output

경과 시간		1(hr)	2(hr)	3(hr)
I_i	i_1	0	0	0
	i_2	0.05	0.05	0.05
	i_3	0.04	0.04	0.04
	i_4	0.03333	0.03333	0.03333
O_i	i_1	0.05	0.05	0.05
	i_2	0.04	0.04	0.04
	i_3	0.03333	0.03333	0.03333
	i_4	0.05	0.05	0.05

식(5.130)에 따라서 각 셀의 기여우량을 구하면 표 5.31과 표 5.32와 같다

표 5.34 A에서 물의 부피

경과 시간		1(hr)	2(hr)	3(hr)
Q_i	i_1	1.93333	1.86667	1.8
	i_2	2	2	2
	i_3	2	2	2
	i_4	2.04667	2.09333	2.14

표 5.35 B에서 물의 부피

경과 시간		1(hr)	2(hr)	3(hr)
Q_i	i_1	1.95	1.9	1.85
	i_2	2.01	2.02	2.03
	i_3	2.00667	2.01333	2.02
	i_4	1.98333	1.96667	1.95

3시간 뒤, A와 B의 최종우량은 각각 $2.14m^3$ 와 $1.95m^3$ 이지만 4개의 셀을 모두 통과하는데 걸리는 시간은 동일하다 이것은 A와 B가 모두 동일한 상부사면의 기여면적을 가지고 있다는 것을 의미한다. 하지만 특정한 셀에서 유속이 작아진다면, 최종 유출구를 통과하는 우량에 차이가 있음을 보여준다.

3. 재료 및 방법

가. 연구방법

경기도 양주시 장흥 지역에 매설된 함수비 센서를 통하여 2005년 9월 10~20일 동안의 함수비를 측정하고 동역학적 습윤지수를 검증하였다. 하지만 2005년에는 산사태를 발생시킬 수 있는 강우가 발생하지 않았기 때문에, 1992년 8월의 3일간 발생한 261mm의 강우자료를 이용하여 정상강우와 비정상강우에 대하여 각각 모의를 실시하였다.

실제 강우는 비정상강우이기 때문에 TOPOG나 SINMAP 등과 같이 정상상태흐름을 가정하는 모델들은 비정상강우를 반영할 수 없으며, 동역학 모델에서 비정상강우를 모의함으로써 시간의 경과에 따라서 변화하는 침투율에 의해 지표하흐름의 분포가 형성되는 양상을 관찰하고 정상강우의 경우와 비교하고자한다. 그리고 모든 우량이 유역 출구에 도달했다는 가정을 바탕으로 하는 TOPOG와 SINMAP의 경우 단기간에 걸친 흐름양을 파악하기가 힘들다. 하지만 본 연구에서 이용한 동역학 모델의 경우, 기여면적이 아닌 기여우량의 개념을 적용했고, 시간의 경과에 따라서 포화깊이를 산정할 수 있기 때문에 이를 비교하고자한다. 마지막으로 침투이후에, 강우가 지표하흐름을 따라서 지형이 수렴하는 곳에 누적되는 경향을 관찰하고 토심에 대한 포화깊이를 산정하여 무한사면안정해석을 함으로써 위험지역을 예측하고자 한다.

나. 현장계측

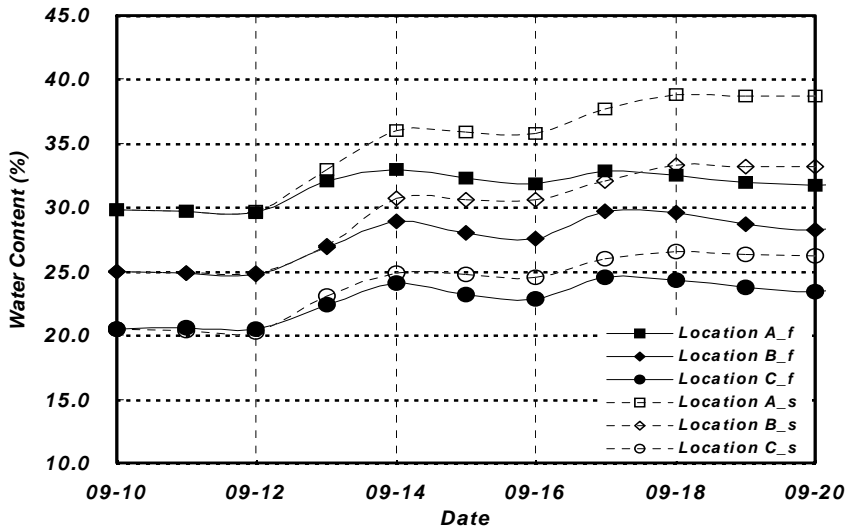
현장 데이터는 본 연구 제4장에서 계속적으로 모니터링을 실시한 경기도 양주군 장흥 현장의 계측자료를 사용하였다

다. 동역학적 습윤지수

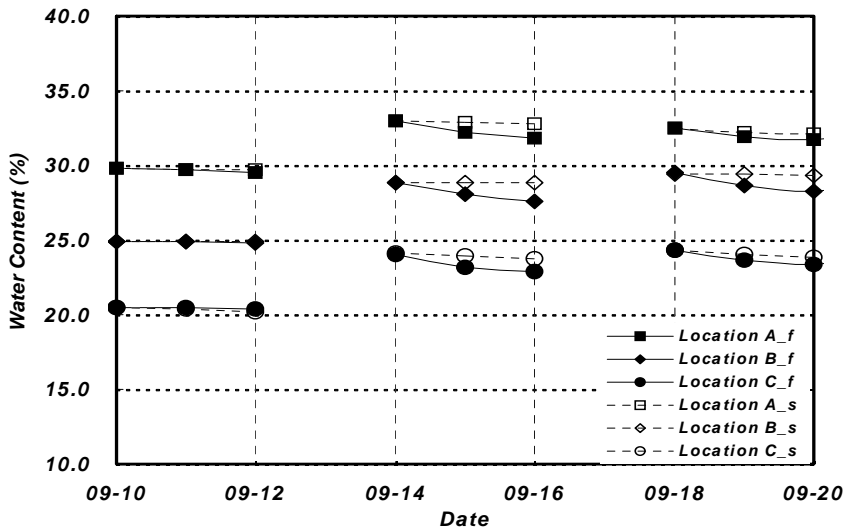
장흥의 연구지역에 매설된 함수비 센서로부터 획득한 자료와 지표하흐름양 계산 방법에 따라서 지표하흐름량을 계산하고 습윤지수를 구하여 이를 비교하였다.

습윤지수는 토심에 대한 포화깊이를 말하며 함수비로 표현한다(Barling 등, 1994). Fig 5.4는 현장계측에 의한 함수비와 모의에 의한 동역학적 습윤지수를 보여준다. Fig 5.4(a)은 습윤지수를 구하기 위하여 9월 10일에 실측된 함수비를 초기함수비로 하여 모의하였으며, 강우가 발생한 13일과 17일을 전후로 하여 함수비가 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 동역학적 습윤지수의 경우, 강우가 발생하는 시점에서 실측된 함수비보다 더욱 증가하는 경향을 보인다. 이것은 동역학 모델에서 증발산량과 기저유출 등의 지표하흐름량의 감소요인을 반영하지 않은 것에서 기인한다. Fig 5.4에서 $A_f \sim C_f$ 는 실측된 값이며 $A_s \sim C_s$ 는 모의된 값이다.

본 연구에서 흐름의 분포를 구하는 목적은 강우 종료 후에 발생하는 습윤지수의 분포를 관찰함으로써 흐름이 집중되는 곳을 파악하고, 산사태에 대한 안정성을 분석하는 것이기 때문에, 모의 기간 동안의 강우를 배제하여 습윤지수를 구하고 이용가능성을 검증하였다. 따라서 9월 13일과 17일의 강우를 배제하고 강우종료 후의 함수비를 초기함수비로 하여 습윤지수를 구하면 그림 5.68(b)와 같다.



(a) 날짜별 함수비



(b) 정규화된 날짜별 함수비

그림 5.68 현장데이터와 모의 데이터의 함수비

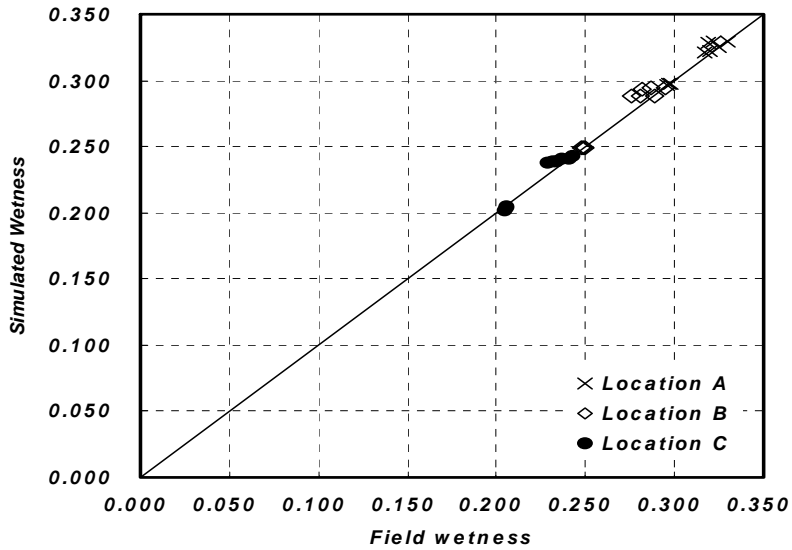


그림 5.69 현장 습윤지수와 모의 습윤지수와의 관계

그림 5.69는 그림 5.68 (a)에서 각각의 위치에 대한 실측치와 모의된 값의 비교를 보여주고 있으며, 표 5.36에서와 같이 전체적으로 높은 상관관계를 보여주고 있다. 이것은 단기간에 걸쳐 습윤지수에 대한 모의가 이루어질 때, 지표하의 투수계수가 아주 낮아서 지표하흐름의 변화에 미치는 영향이 작기 때문인 것으로 보이며, 본 연구에서는 단기간에 걸친 모의를 목적으로 하기 때문에 습윤지수의 분포를 구하기 위한 모델로서 이용하고자한다.

표 5.36 각 위치에서의 예측된 습윤지수 R^2

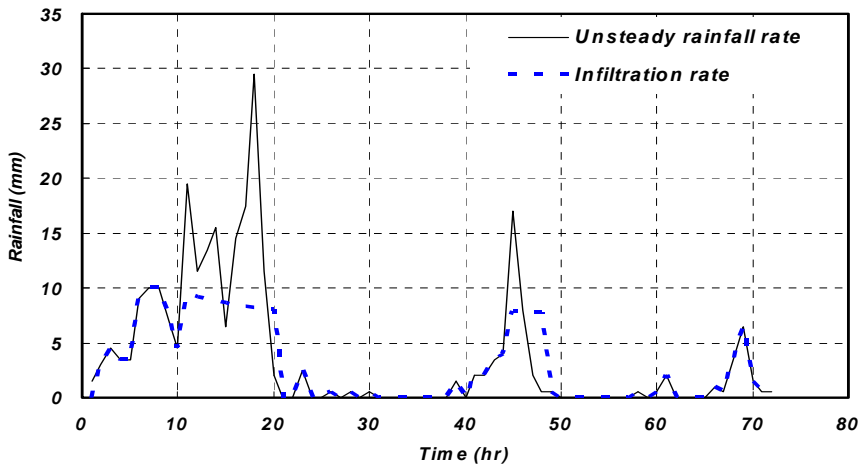
	Location A	Location B	Location C
R^2	0.9210	0.9808	0.7033
	0.9565	0.9809	0.9241
	0.9921	0.9744	0.9703

4. 자료 수집

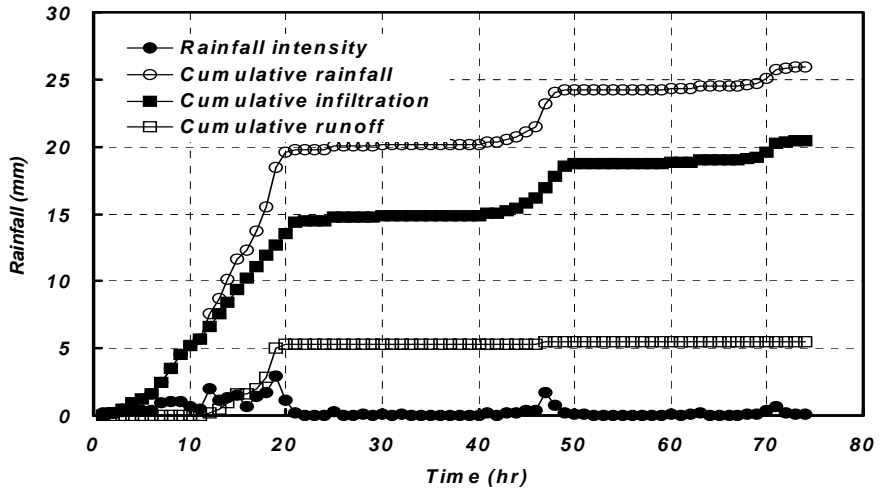
가. 강우량 및 침투량 산정

강우량은 1992년 8월 9일~11일까지 발생한 강우자료를 이용하였으며, 동일한 지역에 총강우량 261mm의 강우가 정상강우로 발생하는 경우와 비정상강우로 발생하는 경우로 구분하였고 이때, 정상강우는 시간당 3.625mm의 강우강도에 해당된다. 침투량은 4.1절의 Green-Ampt Mein-Larson(GAML)을 바탕으로 한 Chu의 침투공식(Chu, 1973)을 사용하였으며, 투수계수는 현장에서 시료를 채취하여 정수두시험으로 산출하였고, 시험에 의한 투수계수를 바탕으로 침투율을 산정하였다.

그림 5.70(a)는 획득한 자료를 바탕으로 지표하로 침투되는 강우의 침투율과 강우강도를 보여주며 (b)는 누적강우, 누적침투량, 누적유출량을 각각 보여준다. 정상강우의 경우는 침투율과 강우강도가 같아서 지표유출 없이 모두 침투된다. 하지만 동일한 총강우량이지만 다양한 강우강도를 보이는 비정상강우의 경우 침투해석 결과, 침투능을 초과할 때는 지표에서 유출이 되어 침투량에 기여하지 않는다. 표 5.37은 비정상강우의 누적강우량, 누적침투량, 누적유출량을 기록한 표이며, 비정상강우의 침투해석결과, 총 204.6mm의 누적침투량이 발생하였으며, 누적침투량을 동역학모델로 습윤지수를 모의하기 위한 총 기여우량으로 하였다.



(a) 강우강도와 침투율



(b) 침투율 계산

그림 5.70 연구지역 강우자료를 통한 침투 계산

표 5.37 시간별 강우 및 침투, 유출 조건 (1992년 8월 9일~11일)

시간 (hour)	강우강도 (cm/h)	누적강우량 (cm)	누적침투량 (cm)	누적유출량 (cm)
1	0.15	0	0	0
2	0.15	0.15	0.15	0
3	0.3	0.45	0.45	0
4	0.45	0.9	0.9	0
5	0.35	1.25	1.25	0
6	0.35	1.6	1.6	0
7	0.9	2.5	2.5	0
8	1	3.5	3.5	0
9	1	4.5	4.5	0
10	0.7	5.2	5.2	0
11	0.45	5.65	5.65	0
12	1.95	7.6	6.62	0.23
13	1.15	8.75	7.55	0.45
14	1.35	10.1	8.45	0.9
15	1.55	11.65	9.33	1.57
16	0.65	12.3	10.2	1.57
17	1.45	13.75	11.05	1.95
18	1.75	15.5	11.88	2.87
19	2.95	18.45	12.71	4.99
20	1.15	19.6	13.53	5.32
21	0.2	19.8	14.34	5.32
22	0	19.8	14.48	5.32
23	0	19.8	14.48	5.32
24	0	19.8	14.48	5.32
25	0.25	20.05	14.73	5.32
26	0	20.05	14.73	5.32
27	0	20.05	14.73	5.32
28	0.05	20.1	14.78	5.32
29	0	20.1	14.78	5.32
30	0.05	20.15	14.83	5.32
31	0	20.15	14.83	5.32
32	0.05	20.2	14.88	5.32
33	0	20.2	14.88	5.32
34	0	20.2	14.88	5.32
35	0	20.2	14.88	5.32
36	0	20.2	14.88	5.32
37	0	20.2	14.88	5.32

시간 (hour)	강우강도 (cm/h)	누적강우량 (cm)	누적침투량 (cm)	누적유출량 (cm)
38	0	20.2	14.88	5.32
39	0	20.2	14.88	5.32
40	0	20.2	14.88	5.32
41	0.15	20.35	15.03	5.32
42	0	20.35	15.03	5.32
43	0.2	20.55	15.23	5.32
44	0.2	20.75	15.43	5.32
45	0.35	21.1	15.78	5.32
46	0.4	21.5	16.18	5.32
47	1.7	23.2	16.98	5.47
48	0.8	24	17.76	5.49
49	0.2	24.2	18.55	5.49
50	0.05	24.21	18.72	5.49
51	0.05	24.25	18.76	5.49
52	0	24.25	18.76	5.49
53	0	24.25	18.76	5.49
54	0	24.25	18.76	5.49
55	0	24.25	18.76	5.49
56	0	24.25	18.76	5.49
57	0	24.25	18.76	5.49
58	0	24.25	18.76	5.49
59	0	24.25	18.76	5.49
60	0.05	24.3	18.81	5.49
61	0	24.3	18.81	5.49
62	0.05	24.35	18.86	5.49
63	0.2	24.55	19.06	5.49
64	0	24.55	19.06	5.49
65	0	24.55	19.06	5.49
66	0	24.55	19.06	5.49
67	0	24.55	19.06	5.49
68	0.1	24.65	19.16	5.49
69	0.05	24.7	19.21	5.49
70	0.35	25.05	19.56	5.49
71	0.65	25.7	20.21	5.49
72	0.15	25.85	20.36	5.49
73	0.05	25.9	20.41	5.49
74	0.05	25.95	20.46	5.49

나. 투수계수

지반의 포화투수계수를 구하기 위해서, 경기도 양주시 장흥의 연구지역에서 Box sampler를 이용하여 시료를 채취하였다. 본 연구사면의 경우, 잔적토층이 심도 1m를 경계로, 그 이하에서는 풍화된 암석 파편들이 나타나므로 1m를 기준으로 2개의 층으로 구분하였으며 Fig 5.7에 나타난 바와 같이 심도 50cm와 120cm에서 시료를 채취하였다. 하지만 조기유출을 고려하기 위하여 120cm에서의 포화투수계수로 침투율을 산정하였다. 기초물성시험 및 투수시험은 한국산업규격(KSF)에 명시된 실험방법에 의거하여 수행하였으며 투수시험은 정수두 투수시험을 실시하였다. 물성치와 투수계수는 표 5.38과 같다.

표 5.38 흙의 물성치

Layer	G_s	Dry unit weight (KN/m^3)	porosity (%)	PI (%)	USCS	K_s (cm/s)
120cm	2.63	15.22	42.12	15.66	SC	1.92×10^{-4}

다. 토심

본 연구에서는 토심에 영향을 주는 인자 가운데서 사면의 경사도를 가장 큰 영향인자로 보고, 연구지역의 유역에 대한 토심은 USGS에서 사면의 경사도에 따라 Table 4.1에 제안된, 토심을 경사도에 대한 식으로 표현된 식(4.20)을 사용하여 유역내의 토심을 구하였다.

그림 5.71은 식(5.127)로 얻은 토심으로써 유역의 출구인 북동쪽으로 향할수록 경사가 완만해지면서 토심이 깊어지는 것을 보여 준다.

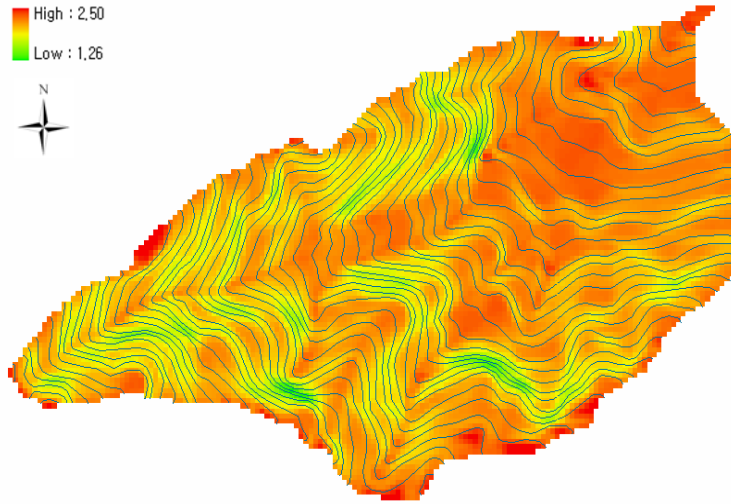


그림 5.71 토심 분포

5. 결과 및 고찰

가. 정상강우와 비정상강우의 비교

정상강우를 가정하는 TOPOG나 SINMAP은 모든 강우량이 임의의 점에 기여한다고 가정하고 있다. 반동역학 습윤지수(Barling 등, 1994)를 사용하는 모델의 경우, 정상상태에 도달할 때까지 모델을 모의했을 때 위의 모델들과 유사한 습윤지수를 획득하게 된다. 하지만 정상상태에 도달하기 위해서는 장시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 단기간의 습윤지수를 구하기 때문에 동역학 모델로 정상강우와 비정상강우에 대해서 각각 모의함으로써 흐름의 분포를 파악·비교해보고, 동역학 모델의 습윤지수를 구하여 유역내에서의 상대적인 습윤지수의 분포를 살펴보았다.

경기도 장흥의 1992년 8월 9일~11일 사이에 발생한 강우량 261mm에 대해서 비정상강우에 대한 침투해석을 함으로써 실질적인 우량인 204.6mm에 대한 포화깊이의 분포와 261mm를 정상강우로 가정하였을 경우의 포화깊이 분포를 모의하였다. 그 결과, 비정상강우는 강우의 시간 간격에 있어서 강우강도가 변화하기 때문에 토양의 침투율을 초과할 때 지표 유출로서 지표흐름을 발생시키게 된다. 이 때, 지표하로 침투하는 우량이 감소하므로 그림 5.72 그림 5.73의 정상강우에 대한 포화깊이가 그림 5.72, 그림 5.73의 비정상강우에 대한 포화깊이보다 큰 값을 보인다. 두 강우 종류 모두, 시간의 흐름에 따라서 계곡이 형성되는 것을 볼 수 있으며 유역의 출구인 북동 방향을 향하여 형

성되는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 5.70 그림 5.76에서와 같이 계곡이 유역의 상부에서 뚜렷이 형성되고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 동역학 모델이 시간의 경과에 따라서 지표하흐름을 모의하기 때문에 경사가 가파른 유역의 상부에서 유속이 크므로 생기는 결과이다. 그림 5.74과 그림 5.77의 그래프는 강우 종료 후, 5일 후, 10일 후, 15일 후의 포화깊이에 대한 셀 수의 변화량을 보여주는 것으로서, 시간이 경과함에 따라서 포화깊이의 분포가 넓어 지는 것을 알 수 있다.

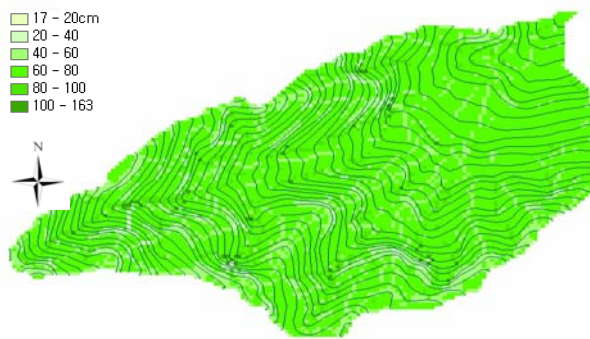


그림 5.72 정상강우시 포화깊이 - 강우 5일 후

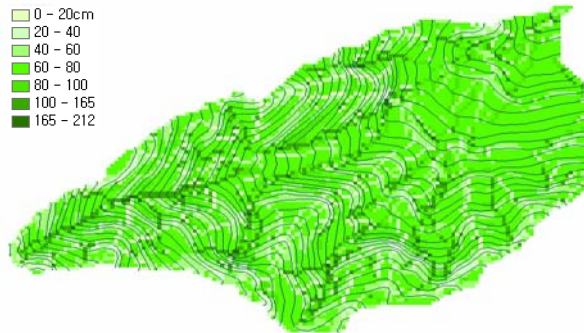


그림 5.73 정상강우시 포화깊이 - 강우 15일 후

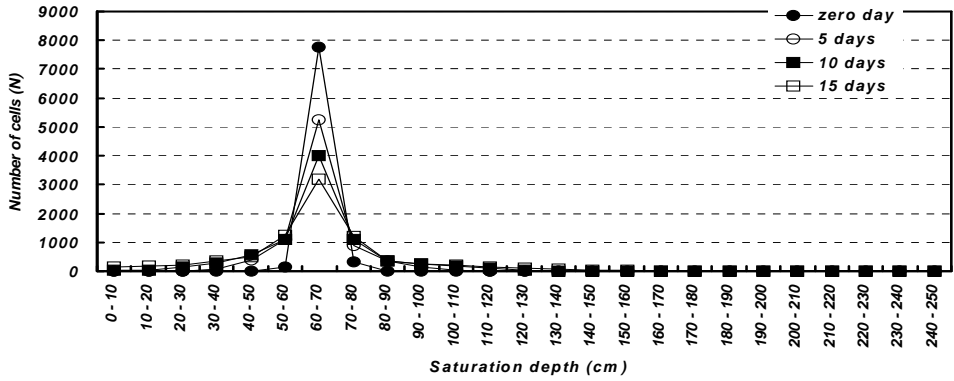


그림 5.74 포화깊이별 셀의 개수 - 정상강우

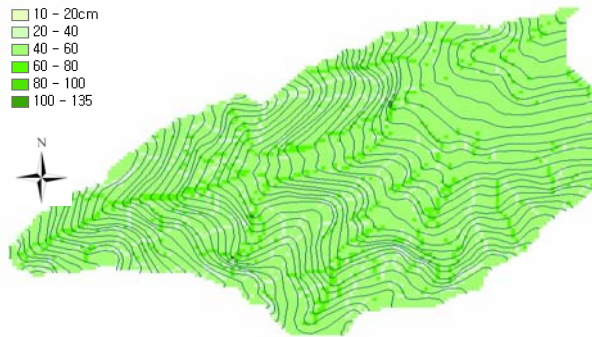


그림 5.75 비정상강우시 포화깊이 - 강우 5일 후

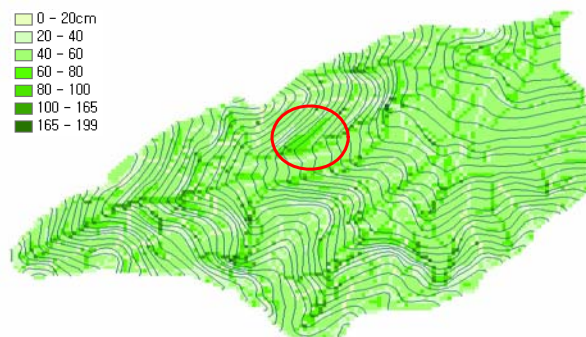


그림 5.76 비정상강우시 포화깊이 - 강우 15일 후

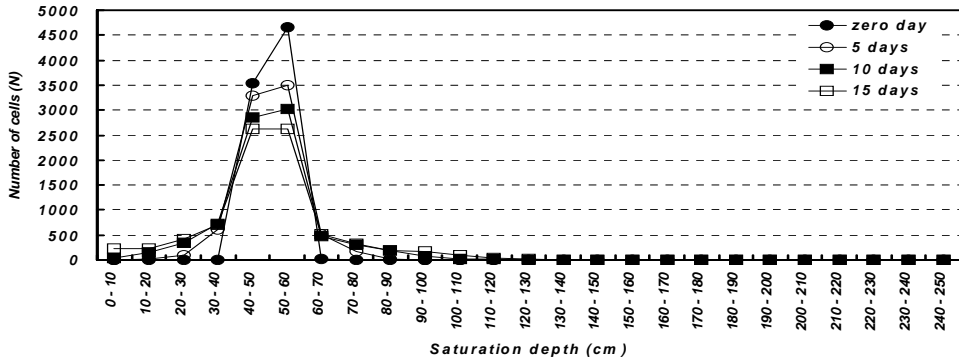


그림 5.77 포화 깊이별 셀의 개수 - 비정상강우

그림 5.76에서 동그라미로 표시된 부분은 상부사면의 급경사에 의해서 국부적인 우량의 집중을 보이는 곳이다. 경사가 가파른 사면에서 유속의 증가에 의하여 하부 사면으로 유출이 증가하지만 하부 사면은 완경사이기 때문에 유출이 감소하여 국부적인 우량의 집중을 보이는 것이다. 특히, 정상강우에서는 뚜렷하지 않지만 비정상강우에서는 뚜렷하게 발견할 수 있는데, 그것은 비정상강우의 강우강도가 특정시간에 있어서 정상강우보다 큰 경우가 많기 때문으로, 일시적인 기여우량의 증가에 기인한 것으로 보인다.

그림 5.78, 그림 5.79, 그림 5.81, 그림 5.82는 토심에 대한 포화깊이의 비인 습윤지수를 보여주는 맵으로서, 정상강우와 비정상강우에 대하여 강우 종료 후와 강우 종료 10일 후의 습윤상태의 분포를 보여주고 있다.

정상강우와 비정상강우와의 비교를 위하여 습윤지수를 정상강우의 경우, 7 클래스(classes)로 나누었으며, 비정상강우와의 비교를 위하여 정상강우의 분류기준을 동일하게 적용하였다. 그 결과, 기여우량이 적은 비정상강우의 습윤지수는 정상강우의 습윤지수 보다 적은 5 클래스로 분류되었다. 이 때, 비정상강우는 그림 5.78과 그림 5.79의 습윤지수분포에서와 같이, 정상강우에 비해서 한정된 변화만을 보여준다. 그것은 유출을 고려하지 않은 정상강우가 기여우량이 많으므로 습윤지수의 범위가 넓어서, 다양한 클래스를 폭 넓게 보여주고 있기 때문이다.

강우 종료 10일 후의 분포인 그림 5.79과 그림 5.82에서는 시간에 따라서 계곡이 형성되는 것을 볼 수 있다. 그림 5.75에서 0.35이상의 습윤도를 가지는 셀들은 강우에 의한 기여우량이 없이도 10일이 경과하는 동안, 습윤지수를 일정부분 유지하는 것을 볼 수 있다. 비정상강우인 그림 5.81에서는 습윤지수 0.25에 해당하는 부분으로서 정상강우

와 같이 계곡이 형성되면서 배수가 이루어지고 있으며 동시에, 습윤지수를 유지하고 있는데, 이것은 유입에 관여하는 상부사면이 많은 것을 의미한다. 그림 5.80와 그림.5.83의 그래프는 강우 종료 후, 5일 후, 10일 후, 15일 후의 습윤지수에 대한 셀 수의 변화량을 보이고 있으며 정상강우에서 더욱 다양한 습윤지수의 분포가 나타나고 있음을 보여준다.

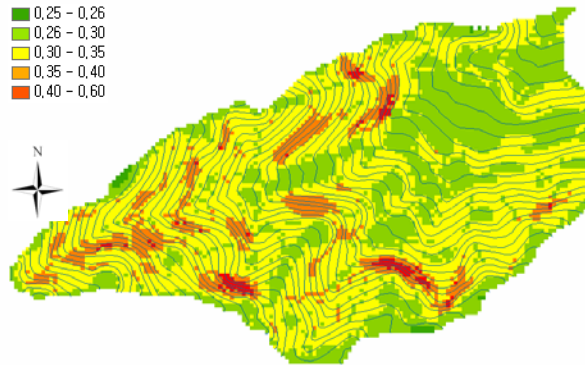


그림 5.78 정상강우시 습윤지수 - 강우 직후

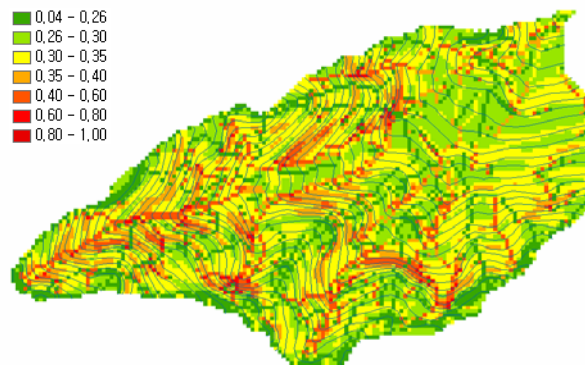


그림 5.79 정상강우시 습윤지수 - 강우 10일 후

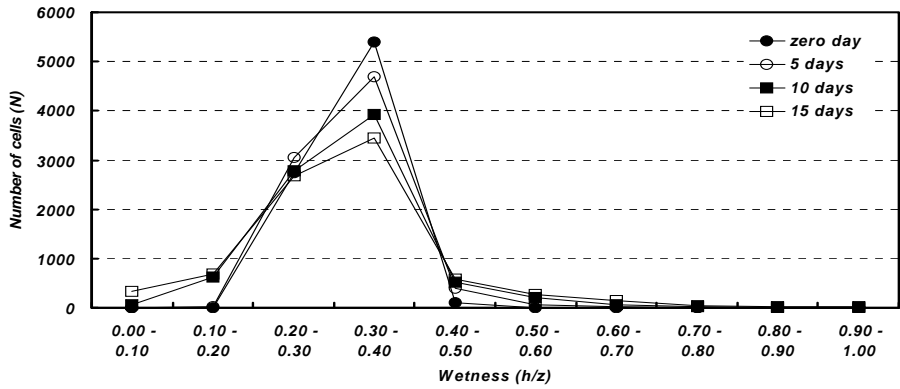


그림 5.80 습윤지수별 셀의 개수 - 정상강우



그림 5.81 비정상강우시 습윤지수 - 강우 직후

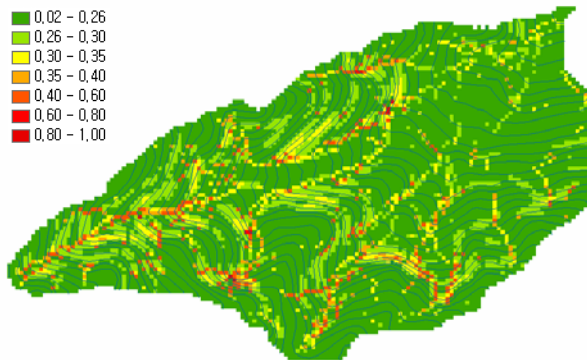


그림 5.82 비정상강우시 습윤지수 - 강우 10일 후

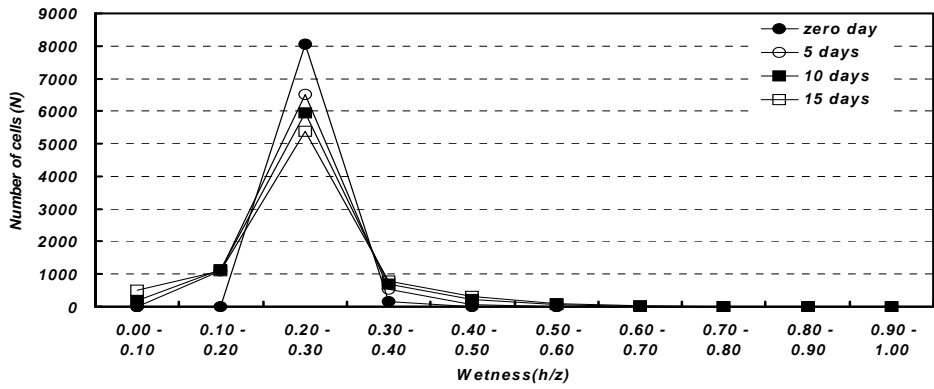
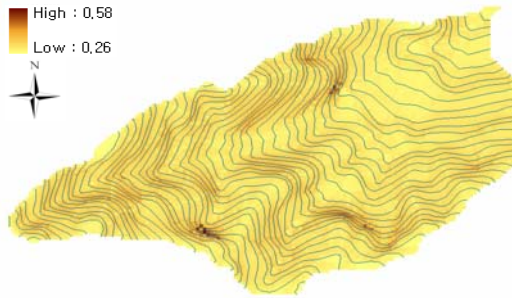
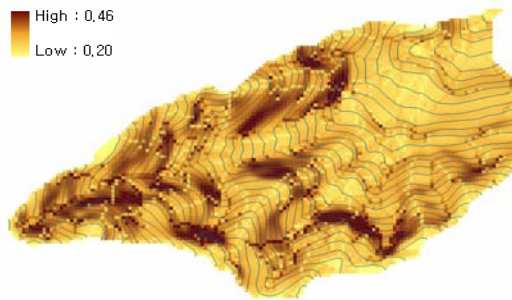


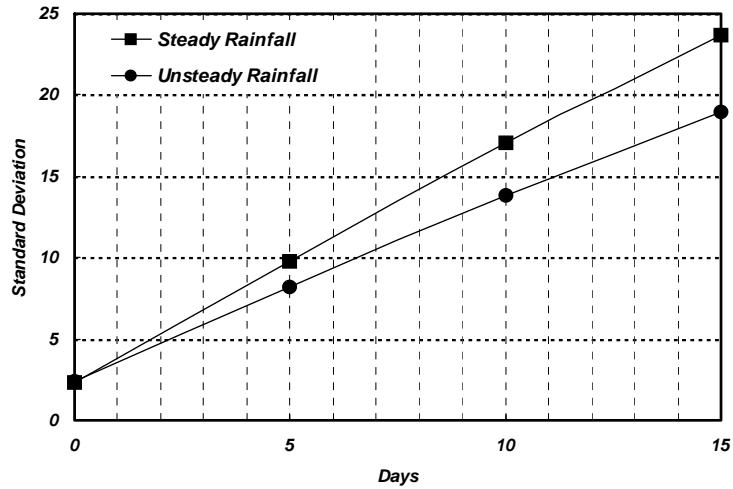
그림 5.83 습윤지수별 셀의 개수 - 비정상강우



(a) 습윤지수-정상강우



(b) 습윤지수 - 비정상강우



(c) 습윤지수의 표준편차

그림 5.84 습윤지수 비교

그림 5.84(a)와 (b)는 정상강우와 비정상강우의 습윤지수를 최대값과 최소값의 범위에서 그 분포양상을 도시한 것이다. 특이한 것은 그림 5.84의 (c)에서 정상강우의 표준편차가 비정상강우의 표준편차보다 크지만 정상강우인 (a)보다 비정상강우인 (b)가 습윤지수의 전범위에 걸쳐서 고른 분포를 보여주고 있는데, 이것은 그림 5.75, 그림 5.76과 그림 5.78, 그림 5.82에서 정상강우가 더욱 다양한 습윤지수의 분포를 보이는 것과는 대조적이다. 이러한 현상은 그림 5.82에서와 같이 비정상강우의 비정상적인 침투율에 의하여 형성된 분포로서, 정상강우와의 차별성을 보여주는 것이다. 이것은 그림 5.82에서와 같이 약 40시간 이후에는 정상강우가 더욱 큰 침투율을 보이고 있지만 강우초기에서부터 약 40시간까지의 누적침투량은 비정상강우가 더욱 커서 지표하흐름에 영향을 미치기 때문이다.

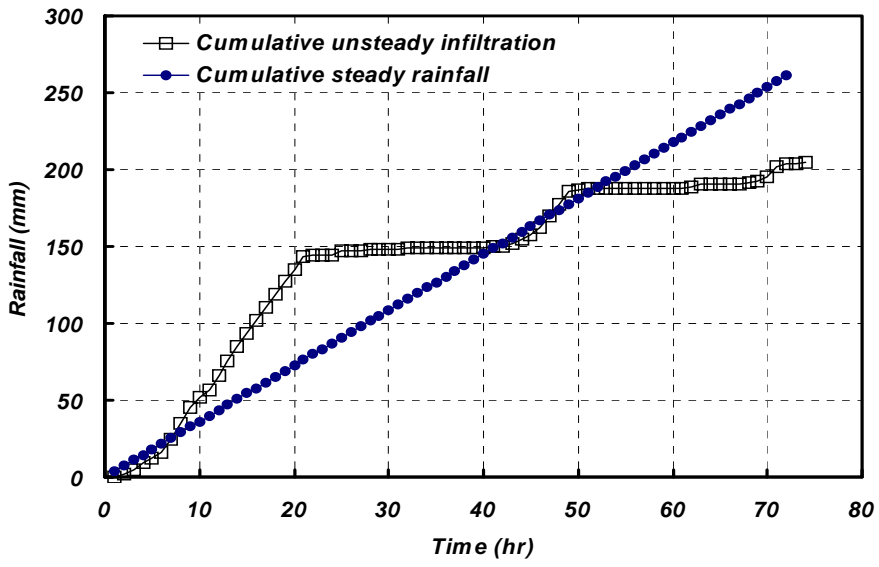
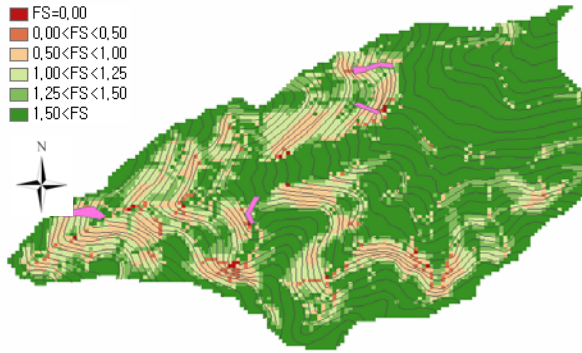


그림 5.85 정상강우와 비정상강우시 누적 침투량



(a) 정상상우시 안전율



(b) 비정상강우시 안전율

그림 5.86 강우 유형별 안전율

그림 5.86은 비정상강우와 정상강우의 안전율을 비교한 것으로서, 지표하흐름의 기여우량의 차이로 인해서 안전율 1이하의 지역이 비정상강우보다 정상강우에서 더욱 많은 부분을 차지하고 있다. 이것은 동역학 모델에서 비정상강우에 대한 침투해석으로 조기 유출을 고려할 수 있고, 현실적인 침투율을 반영하여 유출이 고려된 침투량으로 정밀도를 더욱 높일 수 있음을 알 수 있다.

나. 비정상강우에 대한 안전율 비교

1) 비정상강우의 안전율

동역학모델로 산정한 포화깊이로부터 안전율(Safety factor)을 산출하였다. 안전율의 변화를 산사태 예측 모델인 SINMAP과 비교가 용이하도록 동일하게 6개의 클래스를 적용하여 안전율을 표시하였다.

그림 5.80~그림 5.83은 각각 경과시간에 따른 안전율의 변화를 보여주고 있으며, 강우 종료 직후 유역 상부의 경우, 계곡을 따라서 안전율이 작은 값을 보이고 있고, 유역의 중간부에서는 계곡의 주변부를 따라서 낮은 안전율을 형성하고 있다. 하지만 유역의 하부인 북동쪽의 경우 대부분이 1이상의 안전율을 보이고 있는데, 이것은 대부분이 완경사지로서 유속이 느리기 때문에 상부사면의 기여우량이 적기 때문이며, 고도가 높은 상부에 비해서 토심이 깊기 때문이다.

그림 5.87에서 안전율이 작은 곳은 대부분 경사가 가파른 곳이며 유역의 하부로 향할

수록 경사는 완만해 진다. 또한 유역의 하부로 향할수록 그림 5.71에서와 같이 토심이 깊어지기 때문에 안전율이 높은 것으로 보인다.

그림 5.88~그림 5.90은 각각 강우 종료 5일 후, 10일 후, 15일 후로서 계곡을 따라서 지표하흐름양이 집중하기 때문에 계곡을 따라서 안전율이 감소하고 있고, 주변부는 배수로 인해 안전율이 증가하는 것을 보이고 있다.

강우 종료 직후의 안전율인 그림 5.87의 유역에서는 과거에 네 군데의 위치에서 산사태가 보고되었으며 모두 습윤상태를 유지하는 곳이다. 특히, A 위치는 계곡이 아닌 일반사면으로서 15일 동안 꾸준히 습윤상태를 유지해 온 곳으로서 하부의 환경사지에 의해서 지표하흐름의 정체가 발생하여 습윤지수가 높은 곳이다. 나머지 3군데의 위치는 계곡과 일치하는 곳으로서 토석류가 발생했던 곳이다.

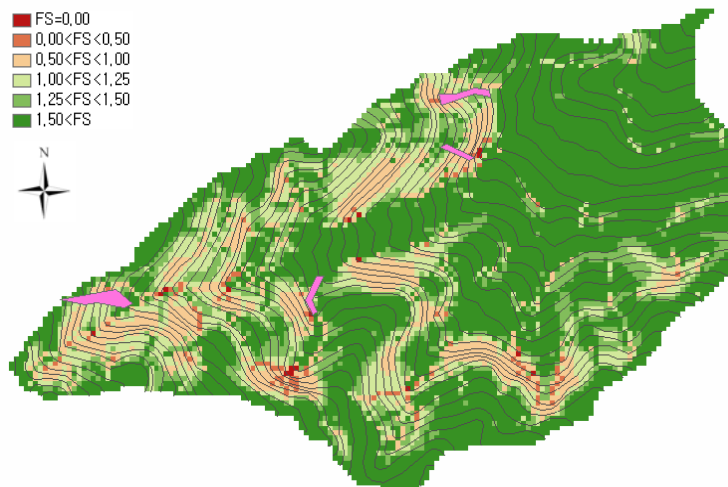


그림 5.87 비정상강우 직후 안전율 분포

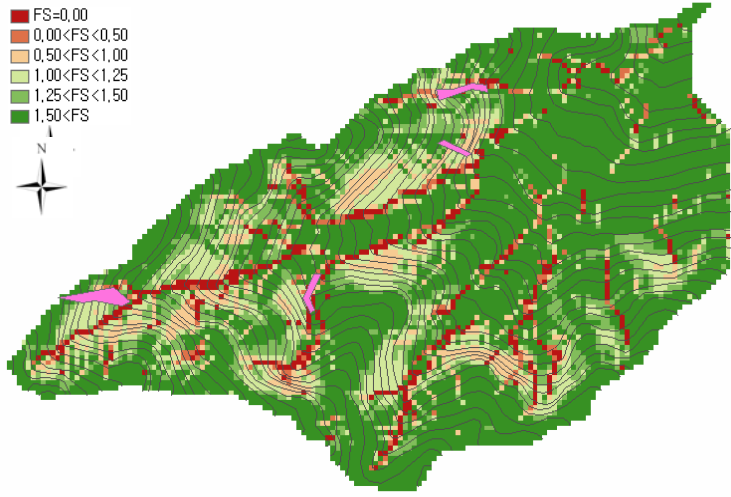


그림 5.88 비정상강우 5일 후 안전율 분포

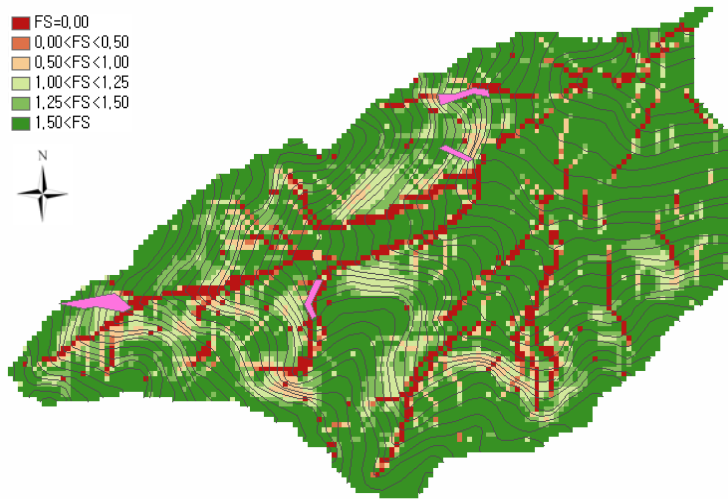


그림 5.89 비정상강우 10일 후 안전율 분포

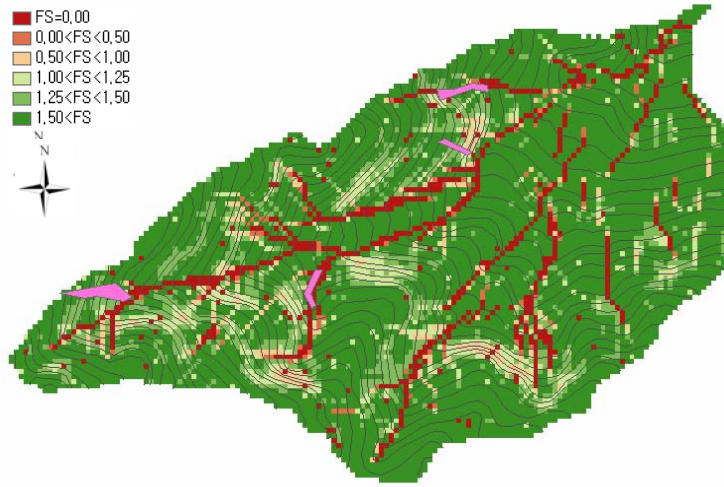


그림 5.90 비정상강우 15일 후 안전율 분포



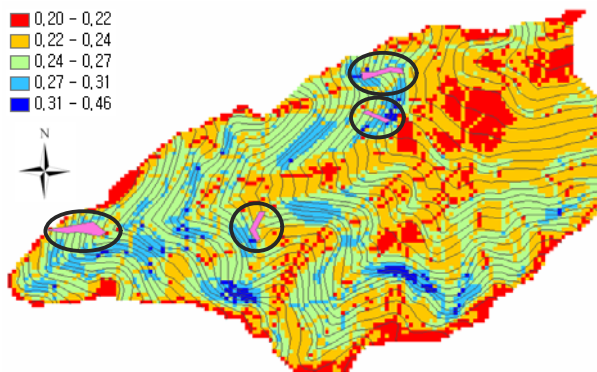
그림 5.91 안전율 분포과 산사태 발생(1992) 지역

그림 5.92는 그림 5.88~그림 5.90의 비정상강우에 대한 습윤지수와 정상강우의 습윤지수를 비교하기 위하여 사용한 클래스와 달리, 비정상강우내에서 더욱 분명히 보이고자 클래스 범위를 다르게 적용하였다. 습윤지수의 변화를 강우 종료 후, 종료 5일 후, 그리고 종료 10일 후로 나누어 모의한 결과, 산사태가 일어났던 곳들이 모두 일정한 습

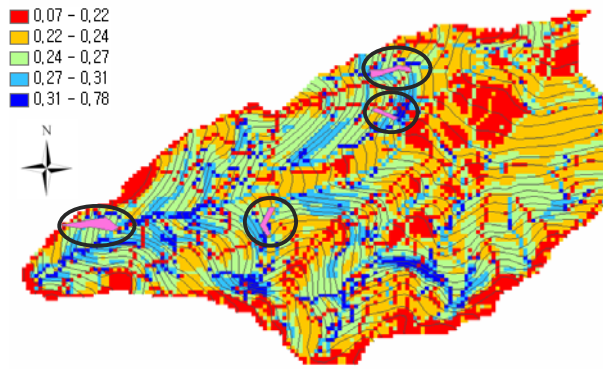
윤상태를 유지하고 있는 것을 보여준다. 습윤지수의 분포를 파악하는 것은 다음 강우에 대해서 선행강우가 시간의 경과에 따라서 분포되는 특성을 파악하기 위한 것과, 지형에 따라서 흐름양이 누적되는 곳이라면 현재에는 파괴에 이르지 않았더라도 항상 불안정성을 내포하고 있기 때문에 산사태를 예측하기 위한 기초 자료로서 활용하기 위함이다.

동역학모델로 습윤지수를 구하고 안전율을 산출한 결과, 과거에 산사태가 발생한 위치는 모두 15일 동안 계속 습윤상태를 유지하는 곳이다. 배수시간이 경과함에 따라서 계곡이 형성되는 것을 관찰할 수 있지만 이것은 일반적으로 구할 수 있는 계곡과 차별성이 거의 없다.

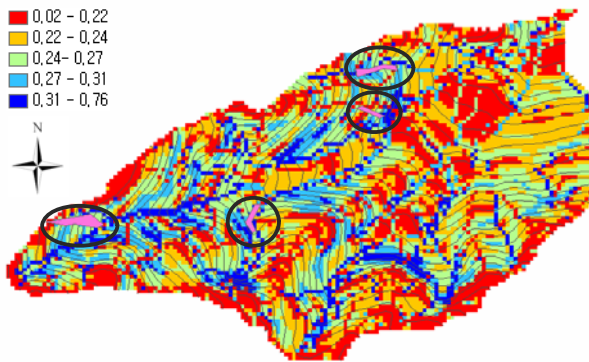
그러므로 동역학모델은 단기간에 걸친 우량의 변화를 관찰할 수 있다는 장점과 함께 강우 종료 후나 강우 종료 5일 후가 안전율을 산출하는데 적합한 모의시간으로 볼 수 있다. 그것은 5일 이후의 시간에서는 계곡으로 대부분 배수가 이루어져서 습윤지수의 분포가 계곡에 걸쳐서 집중적으로 분포하기 때문이다.



(a) 강우 직후



(b) 강우 5일 후



(c) 강우 10일 후

그림 5.89 강우 종료 후 습윤지수 변화

그림 5.93에 표시된 다섯 곳은 습윤지수 분포를 모의한 결과, 꾸준히 습윤상태를 유지한 곳이며 산사태의 이력이 있는 네 군데의 위치와 같이 1이하의 안전율을 보임으로서 산사태 발생 위험지로서 분류하였다.

강우 종료 직후의 그림과 달리 그림 5.88의 강우 종료 5일 후에는 지표하흐름이 계속으로 배수됨으로서 습윤지수가 작아지기 때문에 위험지역이 더욱 감소하는 것을 볼 수 있다. 그것은 지형의 특성상 계곡이나 유역의 출구에서 상부의 기여우량이 증가하기 때문에 계곡을 따라서 위험지역이 형성되기 때문이며, 이러한 변화는 시간에 따른 위험지 예측을 위한 모의도 가능함을 보여 준다.

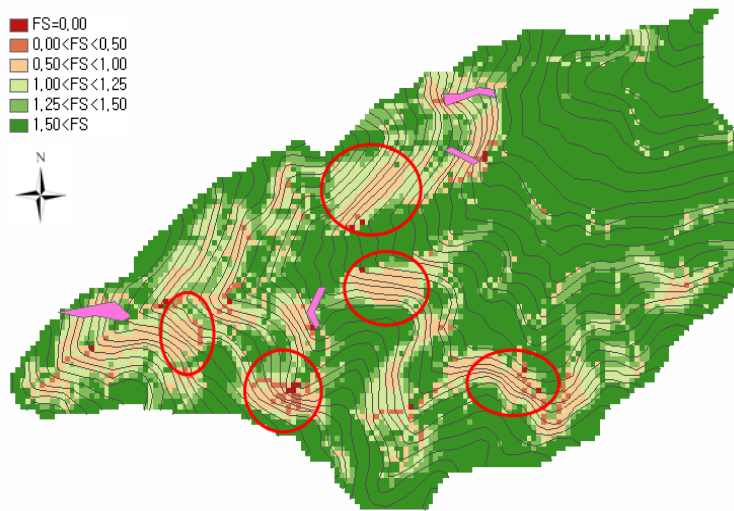


그림 5.93 산사태 발생 가능 지역 예측

본 연구의 동역학 모델은 증발산이나 기저유출 등 정밀한 수문현상을 고려하지 않았지만, 동역학 모델로 지표하흐름을 추적함으로써 모의된 유역내에서의 상대적인 지표하흐름양 분포를 파악할 수 있기 때문에 유역내에서의 상대적인 위험지 예측 자료로서 활용이 가능하다.

특히, 모든 우량이 유역 출구로 배수된다는 것을 가정하는 TOPOG나 SINMAP의 경우, 기여면적이 작으면 기여우량 또한 작은 값을 보이게 되지만 동역학 모델의 경우, 시간의 경과에 따른 습윤지수의 분포를 볼 수 있기 때문에 유역의 상부에 위치한 사면의 지표하흐름이라도, 특정 시간에 있어서의 기여우량은 유역 유출구의 기여우량과 비슷하거나 더 클 수 있으며, 이것은 그림 5.86에서 표시된 위험지와 같이 높은 습윤지수에 의해서 상부고도의 사면이 불안정한 상태에 도달하는 것에서 알 수 있다.

2) 동역학모델의 안전율과 SINMAP의 안전율 비교

동역학모델을 비교하기 위하여 분포형 모델인 SINMAP에서 얻은 결과와 비교하였다.

SINMAP에서는 안전율을 구하기 위하여 무한사면안정해석(Hammond 등, 1992)식을

사용하며 토심과 포화깊이를 사면의 경사에 수직으로 보고 식(5.31)로부터 식(5.133)의 안전율을 유도하였다.

$$FS = \frac{C + \cos \beta \left(1 - w_i \frac{\gamma_w}{\gamma} \right) \tan \beta}{\sin \beta} \quad (5.133)$$

여기서 w_i : 토심에 대한 포화깊이의 비

그림 5.94은 SINMAP에서 구한 안전율이며, 그림 5.95는 동역학모델에서 구한 안전율을 각각 Grid에서 보여주고 있다. SINMAP의 경우 산사태가 발생한 곳과 평가된 안전율이 일치함을 보이고는 있지만 안전율이 1이하에 해당되는 부분이 유역의 38%를 차지한다. 이것은 ‘아주 적은 양의 정보를 이용해서 정밀한 진단이 필요한 지역을 판단해야한다(Terrain stability mapping practice in British Columbia, 1995)’는 광역적 산사태 모형의 간편성에 충실하지만 광범위한 지역에 대하여 정밀한 진단을 요하고 있기 때문에 정밀도에 있어서는 부족함을 보이고 있다. 하지만 동역학모델의 경우, 기존의 산사태 발생지역과 잘 일치하면서 안전율이 1이하인 지역이 23%로 15%가 감소한 결과를 도출함으로써 SINMAP에서 보다 더욱 구체적인 위험지를 예측하고 있음을 알 수 있다.

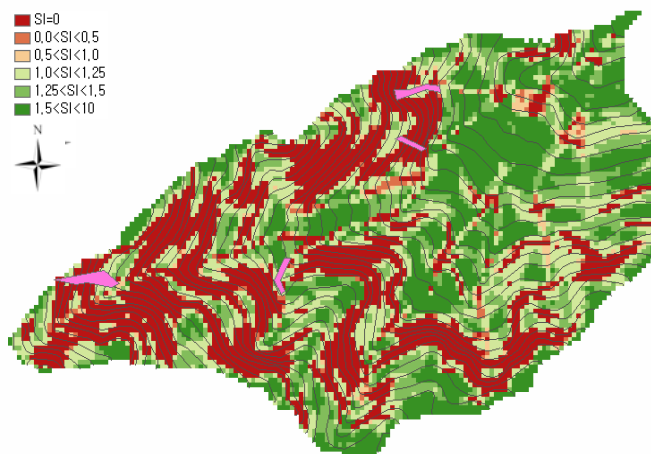


그림 5.94 안전율 - SINMAP

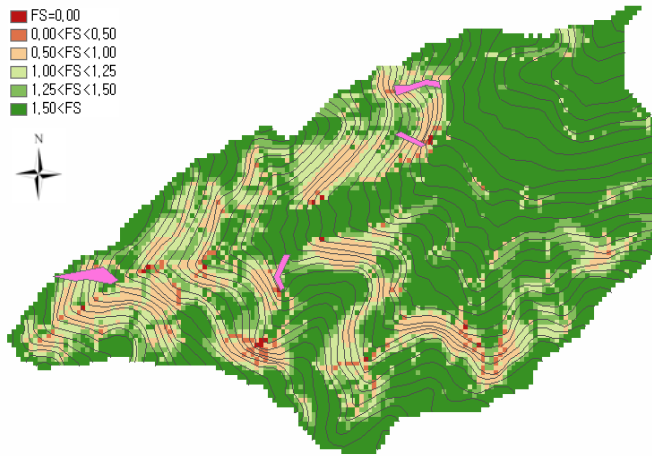


그림 5.95 안전율 - 동역학모델

동역학모델이 시간의 경과에 따라서 우량이 집중하는 곳을 잘 묘사하고 있다는 것을 보이기 위하여, SINMAP에서 구한 포화도를 보여주는 지도인 그림 5.96과 동역학모델의 습윤지수인 그림 5.97를 비교하였다.

두 그림에서 산사태가 발생한 위치가 모두, 계곡 또는 계곡부근에 위치하는 것을 볼 수 있다. 특히, SINMAP에서는 계곡부근에서 산사태가 발생하는 것을 보여주고 있지만 동역학모델에서는 시간에 따른 우량의 분포특성인 우량이 누적되고 있는 위험지역과 일치하는 것을 볼 수 있다. 그림 5.97의 A지역은 그림 5.94 SINMAP의 안전율에서 위험지역으로 표시하고 있지만 정상상태를 가정하고 있는 그림 5.96의 포화도에서는 흐름이 누적되었음을 확인할 수 없다. 이것은 동역학모델이 강우인자만으로 지표하흐름을 모의하여 사면안정해석을 하고 있지만 위험지의 예측이 가능함을 의미한다.

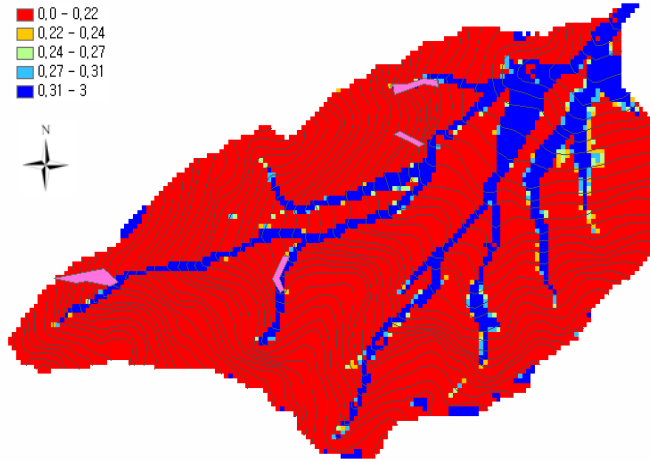


그림 5.96 포화도 - SINMAP

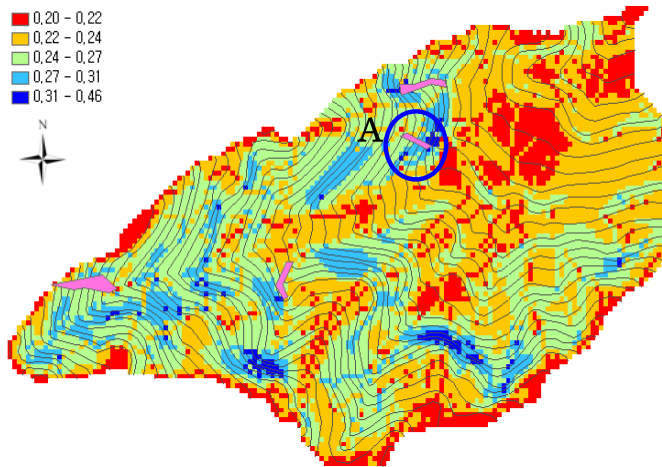


그림 5.97 습윤지수 - 동역학모델

6. 결론

연구지역에서 채취한 샘플에서 토질정수와 정수두 투수시험에 의한 투수계수 등 침투해석모델의 변수를 구하였다. 이를 바탕으로 유출량을 구하여 실질적인 지표하흐름에 기여하는 강우량을 구하고 동역학모델의 모의자료로 사용 하였다. 동역학 모델에 따른 우량의 이동을 Grid에서 표현하기 위하여 알고리즘을 만들고 모의된 동역학적 습윤지수를 장흥의 연구지역에 매설된 센서의 실측치와 비교·검증하였다. 모의된 습윤지수의

분포를 바탕으로 사면안정해석을 하였으며 유역내의 상대적인 위험지를 예측할 수 있었다. 그 결과, 시간에 따라 선행강우의 분포 특성을 관찰함으로써 이후의 강우에 대한 취약지역을 판별하는데 활용이 가능할 것으로 사료된다. 본 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① Green-Ampt Mein-Larson(GAML)에 근거한 Chu(1978)의 비정상강우에 대한 침투해석으로 유출량을 산정하여, 유출이 발생하는 비정상강우와 유출이 고려되지 않는 정상강우를 비교하였다. 그 결과, 침투우량에 차이가 있기 때문에 토심에 대한 포화깊이의 비인 습윤지수가 정상강우 일 때 크게 산정되는 것을 확인하였다. 하지만 비정상강우의 습윤지수가 비정상적인 침투율로 인해 일부 지역에서 지표하흐름이 집중하는 분포특성을 보임으로서 비정상적인 침투율에 의한 습윤지수의 분포특성이 정상강우와 비교할 때 상이함을 알 수 있었다.
- ② 습윤지수를 구하기 위하여 동역학 모델을 기여면적이 아닌 기여우량으로 모의하였다. 연구지역 실측치와의 비교·검증에서 0.9이상의 R^2 를 보임으로서 기여우량에 의한 해석방법의 실용성을 확인하였다.
- ③ TOPOG나 SINMAP의 경우, 모든 강우가 유역의 출구에 도달하였다고 가정하기 때문에 계곡과 유역의 출구로 향할수록 기여면적이 커져서 포화깊이가 깊어진다. 하지만 동역학 모델에서는 계곡이 아닌 계곡 주변부에서 수렴과 발산의 형태를 띠는 지형형상으로 인해서 지표하흐름이 집중하고 습윤지수가 1에 가까운 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 동역학 모델을 기여면적이 아닌 기여우량에 의하여 모의 하였을 때, 급경사지와 완경사지가 상충하는 곳에서 지표하흐름의 정체가 발생하여 습윤지수가 증가하는 것을 확인하였다.
- ④ 흐름이 누적되는 지형에서 안전율은 작은 값을 보였으며 구체적으로 비교하기 위하여, 동역학 모델과 일반적으로 사용하고 있는 분포형 모델인 SINMAP을 비교하였다. 두 모델에 의한 분석에서, 모두 산사태 발생 이력과 일치하는 지역을 위험지역으로 예측하였지만 SINMAP에서는 위험지역을 38%로 폭 넓게 산출하였고, 동역학모델의 경우에는 강우 종료 직후와 종료 후 5일 사이의 안전율의 분포에서 위험지역이 23%로서 SINMAP보다 15% 작은 수치를 보였다. 동역학모델의 경우, 5일 이상이 되면 많은 양의 배수가 이루어져서 계곡부만이 포화깊이와 습윤지수가 커지고 안전율은 현저히 감소하는 것을 보였다. 이것은 지표하흐름에 영향을 미치는 지반의 투수계수와 총강우량에 따라서 모델의 모의 시간을 조정할 필요가 있음을 시사해 준다.

제 7 절 요약 및 결론

자연사면 재해 위험성 평가 시스템 개발을 위하여 역학적 기법을 이용한 결정론적 기법의 산사태 예측모델과 이에 이용되는 수리/수문 모형을 연구하였다. 산사태 예측 모델에 기초자료로 적용하기 위하여 산사태 유발인자의 영향을 규명하고 지형인자를 고려할 수 있는 자연사면 위험성 해석기법을 개발하였다. 또한 기존 자연사면 위험성 평가에 있어 평가 모델의 한계성을 극복할 수 있는 알고리즘을 개발하고 이를 반영한 위험지 평가 시스템을 개발하여 그 효과를 검증하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

① 결정론적 기법의 산사태 예측 모델은 기본적으로 무한사면 안정성 공식에 수문모델을 결합하는 것을 그 기반으로 한다. 이는 무한사면 안정성 공식에 정상상태 수문모델로부터 유도된 습윤지수를 결합하여 사면에 대한 안정성을 평가하게 되는데 각 모델별로 고려 인자에 차이점이 존재하여 연구자의 계획에 적합한 모델의 선택이 필요하다. 또한 기존의 수리/수문 모델은 간편화를 위하여 강우상태를 정상상태로 가정하여 자연 강우사상을 그대로 모사할 수 없다는 한계점이 있어 비정상강우를 고려할 수 있는 수리/수문 모델의 개발이 필요하다.

② 자연사면 재해 위험성 평가 시스템 개발의 기초자료로 사용하기 위한 산사태 유발인자들에 관하여 분석하였다. 토질특성 분석을 위하여 불포화토의 특성과 지반의 고유특성인 함수특성곡선, 강도 특성 등을 분석하였다. 침투특성 반영을 위하여 기존의 Green-Ampt을 기반으로 한 Chu 모델에 수분 재분포현상을 고려하여 수정된 침투모델을 제안하였고 검증하였다. 그 결과 기존 모델보다 실제 현상에 근접한 예측을 할 수 있을 것으로 판단되었다. 또한 프랙탈 차원을 이용하여 지형인자가 사면안정에 미치는 영향을 분석하였으며 식생이 사면에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과 지형의 기복을 나타내는 프랙탈 차원이 증가할수록 불안정한 셀의 비율이 높아졌으며 식생은 토층의 강도 및 수리/수문 특성에 영향을 주는 것으로 나타났다.

③ 자연사면에서 지형의 변화에 따른 안전율 변화추이를 이용하여, 자연사면의 안전율과 평균 경사도로 표현한 평탄사면의 안전율을 비교 분석하였다. 이에 다중셀의 개념을 이용하여 사면 굴곡이 안전율에 미치는 영향에 관하여 분석하였다. 그 결과 사면의 형태(오목사면과 볼록사면)에 따라 안전율의 경향이 다르게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

④ 산사태 위험성 분석을 위한 침투 모델로 Mein-Larson 모델을 선택하였으며, 시간별 강우를 고려할 수 없다는 모델의 한계를 극복하기 위하여 수정된 모델을 제안 검증하였다. 그 결과, 수정된 모델을 적용 할 경우 폰딩시간과 토양의 수분분포의 정확한 예측이 가능하며 시간별 변화를 분석할 수 있어 보다 정확한 사면 위험성 예측에 도움이 될 것이라 판단된다.

⑤ 동역학적 모델을 기본으로 한 지표하 흐름 원리를 이용하여 습윤지수를 산출하여 자연사면 재해 위험성을 판단하고자 하였다. 강우사상은 정상강우와 비정상강우 사상을 고려하였으며, 제안한 모델과 기존의 모델과의 비교를 통하여 검증하였다. 그 결과, 정상강우와 비정상강우의 경우에 차이가 발생하였으며, 동역학 모델 이용시 기존모델의 가정차이로 인하여 불안정한 위치 판정에 차이가 나타났다. 기존의 산사태 흔적과의 비교를 통하여 비정상강우 사상으로 고려하고 동역학 모델을 사용하였을 때 더 정확한 예측을 할 수 있음을 확인하였다.

제 6 장 실무 프로그램 개발

제 1 절 서론

산사태는 강우, 식생, 토질, 지질 등 많은 인자들의 영향을 받아 발생한다. 하지만 구축 시스템의 한계로 인하여 모든 인자들을 종합적으로 고려한 사면안정성평가가 어려운 실정이다. 하지만 최근 지리정보시스템의 발달로 인하여 영향인자들의 자료를 기반으로 하는 평가기법들이 연구되고 있다.

산사태 유발 인자 중 강우는 사면 안정에 직접적으로 작용하여 이에 대한 영향을 분석하는 것이 중요하다. 강우시 토층에 물이 침투하게 되면 토층의 조건이 변화하여 사면 불안정을 야기한다. 따라서 강우가 토층에 침투하고 침투한 물이 지표하에서 흐르는 기작에 관련된 연구가 주를 이루고 있다. 하지만 기존의 연구는 자연상태를 반영하지 못하는 정상상태를 가정하고 있어 그 연구에 한계가 나타나고 있다.

따라서 본 장에서는 광역산사태 위험성도를 작성하고 예측하기 위하여 산사태 예측 모델을 구동시키기 위한 데이터베이스를 구축하며, 사면별 안전율 지도와 소유역별 안전율 지도를 작성하여 위험성을 평가하는 자료로 활용하고자 한다. 또한 본 연구에서 개발된 수정된 침투 모델과 지표하 흐름 모델을 적용하여 광역적인 범위의 사면안정성 평가 시스템을 구축함으로써, 강우시 사면의 산사태에 대한 위험 가능성을 결정론적으로 해석해 내하고자 한다. 최종적으로 개발된 시스템을 대상지역에 적용하고 대상지역에서 실제 발생한 산사태와의 비교를 통해 실효성을 검증한다.

제 2 절 지리정보시스템의 설계 및 자료구축

1. 개요

지리정보시스템은 여러 가지 데이터를 종합적으로 평가하고 처리하기 용이하다. 따라서 많은 분야에서 사용되고 있으며 특히 많은 조건들을 고려해야 하는 자연재해 분야에 많은 연구가 이루어지고 있다. 지리정보시스템의 이용을 위해서는 대상 지역의 입력 변수 데이터베이스가 필요하다. 본 절에서는 광역산사태 위험성도를 작성하고 예측하기 위하여 산사태 예측 모델을 구동시키기 위한 기초자료 데이터베이스를 구축하여 자연사면 위험성을 평가하는 자료로 활용하고자 한다.

2. ArcGIS 소개

GIS(Geographic Information Systems)는 21세기에 접어들면서 급속한 산업 발전, 기술 개발 등을 통해 많은 변화가 이루어지고 있으며, 다양화, 전문화 추세 속에서 정보의 중요성이 점점 더 부각되고 있다. 그에 따라 단편적이고 개별적인 정보의 구축, 공유, 활용뿐만 아니라, 국가적 차원에서 정보의 공유를 주도함으로써 많은 비용과 시간을 절감하면서 효율적으로 정보를 활용할 수 있게 되었다.

최근에 들어와 지리정보의 활용이 점차 늘어나면서 과거 종이지도를 수치지도로 제작하는 단계를 넘어서, 현재에는 인터넷이나 인공위성 등등 다양한 매체를 통해 지리정보를 수집/구축하고 있다. 또한 지리정보를 분석하고 처리하는 과정을 거치면서 고부가가치의 공간 정보를 생성하게 되었고, 공간상에서 야기되는 복잡한 문제를 해결하는데 필요한 정보를 제공하는 단계까지 이르고 있다.

현재까지 많은 GIS 소프트웨어가 개발되고, 활용되고 있지만 ESRI사와 Intergraph사가 GIS 소프트웨어 시장의 70%이상을 점유하고 있으며, 특히 ESRI사가 40%에 육박하는 시장 점유율을 자랑하고 있다. 하지만 이러한 시장점유율이 ESRI사의 ArcGIS가 막강한 틀이 이라는 의미는 아니다. 물론 타사 제품에 비해서 다양한 분야에서 활용성이 크고, 우리나라의 경우 이미 ESRI사의 ArcGIS를 바탕으로 지리정보체계가 구축되었기 때문에, ArcGIS를 사용하는 것이 데이터 관리에 있어서 장점이 된다.

ArcGIS는 지리정보를 만들고 작업하기 위해서 필요한 editing, data automation, map-based tasks, data management, geographic analysis, metadata management, Internet applications 등의 다양한 틀을 제공 한다.

이러한 다양한 틀들은 지리정보를 체계적으로 관리하고 산사태 예측 모델을 구성하는데, 많은 장점과 편의성을 제공하기 때문에 산사태의 예측 모델을 개발하기 위한 데이터 관리 및 생성의 주된 틀로서 이용한다.



그림 6.1 GIS data management

3. 지리정보시스템(GIS)의 설계

지리정보시스템(GIS)은 각각의 모형들과 유기적인 관계를 유지하면서 데이터의 수정을 즉각적으로 반영할 수 있도록 설계 되어야한다.

본 시스템은 외부모듈로서 수리/수문모형, 식생모형, 불포화토 함수특성/강도특성 모형, 지형패턴분석모형, 사면안정해석모형 등으로 구성되고 이들과 자료를 유기적으로 교환하는 GIS DB로 구성되어, 한 지역에 대한 산사태 위험지를 예측할 수 있다. 자료 구축을 위한 프로그램으로서 ArcGIS를 사용하였으며, 개발언어로서 C++를 이용하였다.

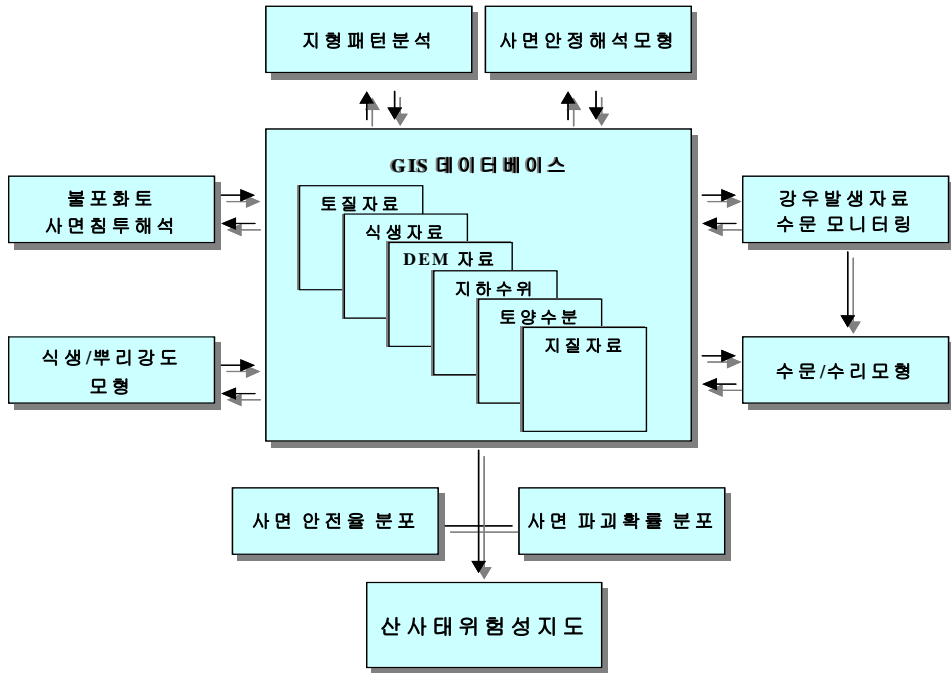


그림 6.2 산사태 위험지 예측 시스템개발 모형

4. 지리정보시스템 자료구축

가. 자료

- 지도자료 : 지형도(수치지형도, 1:5,000), 임상도, 지질도, 토양도
- 발생인자 : 수리/수문 인자, 식생인자, 토질인자, 지형인자
- 계측자료 : 지하수위, 강우자료, 포화심도, 선행강우량

나. 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)

지형도는 국가지리정보시스템(NGIS) 구축 사업의 일환으로 전국을 대상으로 국립지리원이 1:1,000, 1:5,000, 1:25,000 축척으로 제작한 것으로 공간분석 및 외부모듈을 이용하여 경사도, 경사길이, 경사위치, 사면 형태 등 여러 가지 정보를 추출할 수 있다. 본 연구에서는 1:5,000 NGIS 수치지도(도엽번호 : 37608008, 37608009)로부터 등고선을 추출하여 두개의 수치지도의 등고선을 병합하여 하나로 통합하였고, 이로부터 셀 크기가 5m인 DEM을 구축하였다. 그림 6.3는 대상지역의 DEM을 보여주고 있다. 경사도를 구하기 위해서는 수치지형도로부터 등고선을 추출하고 3D Analyst를 이용하여 TIN으로

변환한다. TIN으로 변환하는 것은 등고선 사이의 빈 공간에 표면(Surface)을 형성하여 공간의 분석을 가능하게 하기 위함이다. 이 TIN에서 경사도를 추출하면 셀이 생성되는데, 이를 표현하면 그림 6.4과 같다.

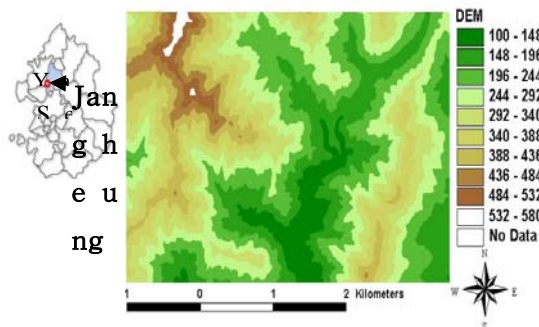


그림 6.3 연구지역의 DEM

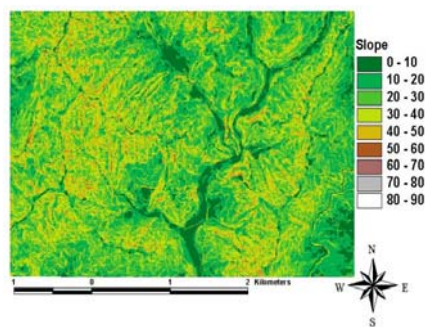


그림 6.4 연구지역의 경사도

다. 토양도

연구지역의 토양도는 농업기반공사의 RGIS 수치지도와 농촌진흥청의 1:25,000 정밀 토양도로부터 생성시킨다. 벡터로 작성된 폴리곤에 각각의 토양을 구분하여 토양통명, 토성, 배수등급, 토심, 석력함량 등을 입력한다(그림 6.5). 그림 6.5에서 CaF2는 청산토이고, 양토(Loam)이며, 석력의 함량이 30%정도이고, 배수등급은 매우 양호하며, 유효 토심은 50cm 정도인 토양에 해당된다. 일반적으로 배수등급의 경우에는 수문학적 토양군으로 분류하여 적용한다.

라. 토심분포도

토심은 USGS에서 제안한 경사도에 따른 토심산정기법을 이용한다(제5장 참고). 그림 8.6에서 하천지역은 토심이 2.2~2.5m로 나타났고, 산복지역에서는 1.0~1.6m의 범위가 주로 나타났으며, 고도가 높아질수록 토심이 감소한다.

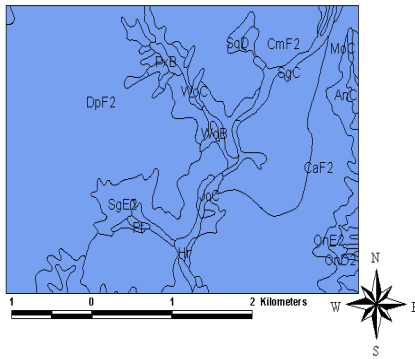


그림 6.5 연구지역의 토양도

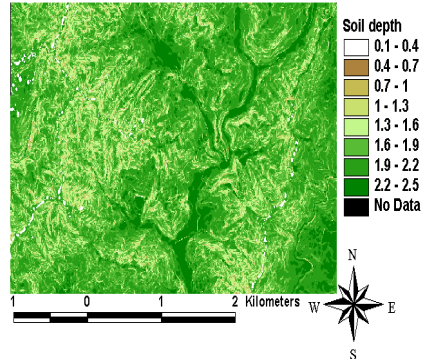


그림 6.6 연구지역의 토심도

마. 유역경계

지표면에서 흘러내리는 하천 유출량은 중력의 영향을 받아 높은 곳에서부터 낮은 곳으로 이동하게 된다. 각 하천은 소유역으로부터 유출량을 받게 되며, 그 유출량은 보다 더 큰 하천에 전달된다. 따라서 Focal cell 함수를 이용하여 흐름 방향도를 만든다.

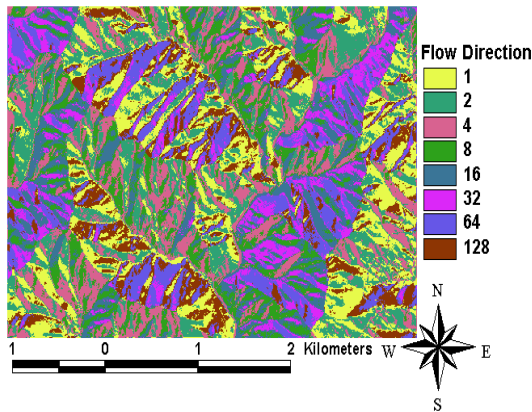


그림 6.7 연구지역의 흐름도

5. 산사태 위치 파악

GIS 설계에 있어서 기본은 지리정보의 획득이다. 그리고 지리정보와 아울러 산사태의 위치를 손쉽게 파악하기 위하여 인공위성영상을 이용하였다.

본 연구를 위해 연구지역인 경기도 양주시 장흥 지역의 산사태 분석에 필요한 관련 자료를 수집하였다. 수집된 자료의 형태는 지도, 보고서, GIS 자료, 위성영상 등이다.

최근에 해상력이 높은 인공위성들이 많이 나와 산사태 발생위치 파악에 활용 가능성이 증대되고 있다. 본 연구에서는 저해상도인 Landsat 7 ETM+에서부터 중·저해상도인 Kompsat 그리고 고해상도인 IKONOS를 각각 비교 분석해서 그 활용도를 검증하고 있다. 고해상도 영상인 IKONOS 영상은 광학적인 해상도가 높아 연구지역을 시각적으로 보여주는 장점을 갖고 있다. 그림 6.8은 연구지역 전체에 대한 위성영상을 나타내고 있으며, 그림 6.9는 그림 6.8에서 산사태가 많이 발생한 일부지역을 확대하여 나타낸 영상을 나타낸다. 그림 6.9에서 산사태가 발생한 곳을 빨간색 폴리곤으로 나타내었다.

산사태와 지형 즉, 곡률, 경사각과의 관계를 살펴보면, 산사태의 발생시점은 평균 289.7m이고, 산사태의 평균발생 길이는 29.8m이다. 산사태의 방향은 북쪽(북서와 북동) 방향이 25곳으로 가장 많고, 동쪽(동북동, 동남동) 및 서쪽(서남서, 서북서) 방향이 16곳과 14곳으로 각각 나타났다. 반면 남쪽방향은 3곳으로 가장 적게 발생하였다. 그러나 기존 연구(토질안정재료위원회편, 1990)에서는 산사태의 발생은 일반적으로 사면방위로 인한 일조시간의 차이에 의해서 토층내의 지하수의 위치, 기반암의 풍화정도, 식생의 생육차이로 인해 남향이 많은 것으로 나타나 본 지역에서의 결과와 다소 차이가 있는 것으로 사료된다. 경사도에 따른 산사태의 발생빈도를 살펴보면, 평균경사의 경우 최소 17.7°, 최대 44.9°이고, 최급경사도의 경우에는 21.7°, 55.0°로 나타났다. 그리고 최급경사와 최저경사의 차이는 최소 1.5°에서 최대 45.8°까지 나타났다.

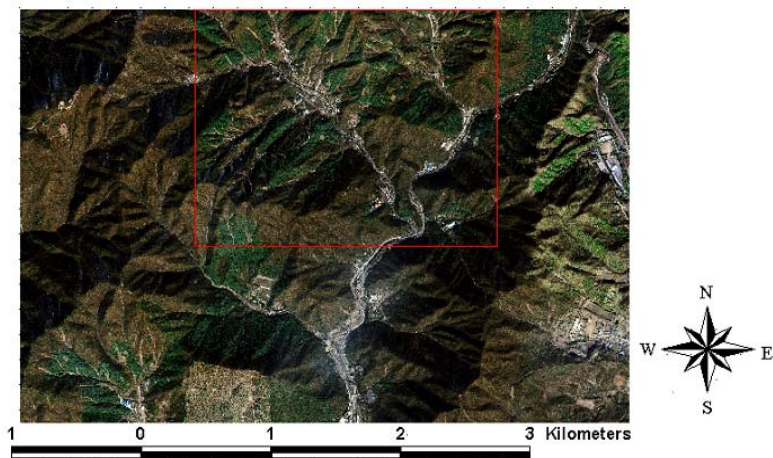


그림 6.8 IKONOS 이미지

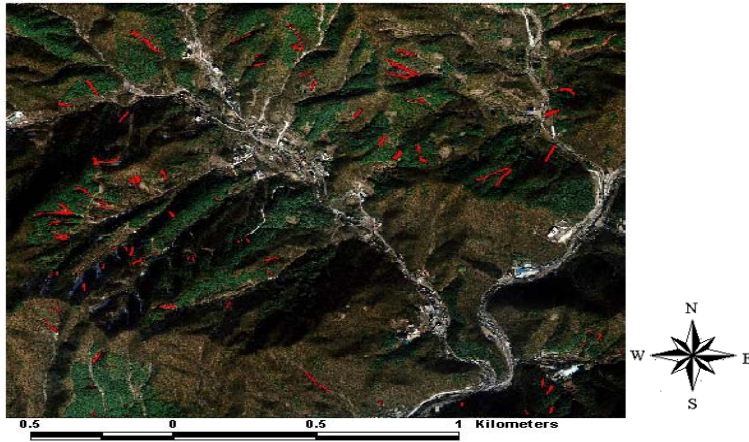


그림 6.9 연구지역의 산사태 발생 위치

6. 결론

프로그램에 필요한 기초자료수집을 하였으며 및 산사태 위치를 파악하였다. 기초자료로 수치표고모델(DEM), 토양도, 토심분포도를 수집하였고 유역경계추출에 필요한 데이터는 실험이나 현장 계측 그리고 이미 구축되어 있는 데이터를 바탕으로 ArcGIS를 이용해 데이터베이스화하여 산사태 예측 모델을 위한 자료를 구축하였다.

제 3 절 프로그램 개발

1. 개요

산사태는 강우, 식생, 토질, 지질 등 많은 인자들의 영향을 받아 발생한다. 이러한 영향인자들의 분석을 통해 역학적으로 산사태 위험도를 산정하게 된다. 여러 인자들 중 특히 강우는 직접적으로 사면 안정에 영향을 미치게 된다. 강우시 토양에 물이 침투하게 되면 토양 내 저항응력이 감소하고 하중이 증가하게 되어 사면이 불안정해지게 된다. 따라서 강우가 발생하였을 때, 물이 흠에 침투하는 기작 분석을 통하여 정확한 침투량을 산정하는 것이 중요하다. 또한 물이 토층에 침투한 후, 사면 형상과 토층의 특성에 따라 지표하에서 물의 흐름이 발생하게 되는데 지표하 흐름 분석을 통하여 이를 예측할 수 있다. 시간의 흐름에 따른 동역학적 물의 흐름 모델을 통하여 강우 발생시 시간에 흐름에 따른 사면 안정도를 산정할 수 있게 된다. 이러한 동역학적 분석은 특정 사면의 해석뿐 아니라 넓은 대상 지역의 분석에도 용이하여 광역적 산사태 위험지 판정에 사용된다.

본 절에서는 자연강우사상을 반영하는 침투모델과 지표하 흐름을 모사할 수 있는 개선된 알고리즘을 사용하여 간단한 입력 자료의 구축으로 광역적인 범위에 적용할 수 있는 사면안정성 평가 프로그램을 개발함으로써, 강우시 사면의 산사태에 대한 위험 가능성을 결정론적으로 해석해 내고자 한다.

2. 위험성 평가 프로그램 설계

강우가 발생하게 되면 물이 토양에 침투하게 된다. 하지만 일정강우 이상이 발생되었을 경우 토양의 침투능이상의 물은 유출되어 지표를 흐르게 된다. 침투된 물은 토양의 특성과 지형적 특성에 따라 이동하게 되고 시간의 흐름에 따라 집정 장소가 발생한다. 물의 집적장소는 역학적으로 불안정하기 때문에 그 파악이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 과정을 반영하는 위험성 평가 프로그램의 개발을 목표로 한다.

위험성 평가 프로그램 개발을 위한 입력자료는 식생의 영향을 반영한 토질정수와 함수특성, 지형인자 등을 기반으로 구축된다. 구축된 자료를 이용하여 토심을 산정하고 강우강도에 따른 침투와 지표하 흐름을 분석하여 습윤지수를 산정하게 된다. 최종적으로 각 시간마다 산정된 습윤지수를 반영하여 산사태 위험 평가를 실시한다. 위험성 평가 프로그램의 흐름도를 그림 6.10에 나타내었다.

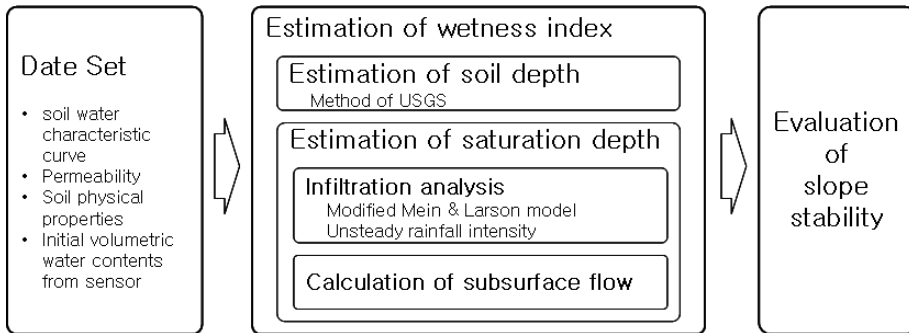


그림 6.10 사면안정 프로그램 흐름도

3. 프로그램 적용 이론

광역적 산사태 위험지 평가를 위한 프로그램의 기본 이론으로 습윤지수를 이용한 안전을 산정 방법과 강우 침투모델, 지표하 흐름 모델 등을 사용하였다.

산사태 위험지 평가를 위한 강우침투모델로 Mein & Larson Model이 주로 사용된다. 하지만 Mein-Larson 모델은 정상상태의 강우를 가정하기 때문에 실제 강우사상을 고려하지 못한다는 한계성을 가지고 있다. 또한 강우가 종료된 시점에서 평균강우강도를 산정하여 정상상태를 가정하고 침투율을 산정하기 때문에 강우시작부터 실시간으로 침투를 예상할 수 없다. 따라서 프로그램 개발을 위한 기본 이론으로 본 연구에서 개발된 비정상강우 사상을 반영할 수 있는 수정된 Mein-Larson 모델을 사용하였다. 수정된 Mein-Larson 모델의 개발과 검증은 “제5장 제5절 비정상강우를 고려한 강우 침투 시스템 개발”에 설명하였다.

광역적 습윤지수를 구하는 Barling 등(1994)의 모델은 기여면적으로 습윤지수를 산정하였으며 이를 반영 무한사면 안정해석을 통하여 자연사면의 위험지를 판단하였다. 하지만 시간의 경과에 따른 재충전율을 고려하지 못하기 때문에 지표하흐름의 분포를 파악하는데 있어서 한계를 내포 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 앞서 선행된 우량을 기본으로 한 습윤지수를 적용하고 동역학적 방법에 의해 산출된 습윤지수를 이용하여 산사태 위험지를 평가하는 알고리즘을 사용한다. 본 방법에 대한 개발 내용 및 검증은 “제5장 제6절 지표하흐름을 고려한 자연사면 위험성 해석 기법 개발”에 설명하였다.

4. 입력 데이터 설계

가. 속성 변수(강우강도 및 토질정수)

1) 화일의 구성

사면안정해석을 수행하는데 있어 사용된 토질정수를 나타내는 파일은 property.dat로 되어있으며 내용은 다음과 같다.

표 6.1 토질정수 속성값

구분	내용	단위
K_s	포화투수계수	cm/hr
porosity	공극률	%
Cohesion	점착력	t/m ²
Phi	내부마찰각	Degree
Gamma_d	건조단위중량	t/m ³
Gamma_t	단위중량	t/m ³
psi_mf	모관흡수력	cm
theta_s	포화체적함수비	%, θ_s
theta_o	현재체적함수비	%, θ_o
StartTimeOfRecording	자료출력 시작시간	hr
EndTimeOfRecording	자료출력 종료시간	hr
IntervalOfRecording	자료출력 시간간격	hr
NumberOfRainfall	강우자료 개수	cm/hr
[value]	각 시간의 강우강도	cm/hr

2) 변수의 산정

가) 강우강도

강우강도는 시우량 자료를 가지고 있는 관측소를 조사하고 티센망을 작성하여 연구 지역을 포함하는 관측소를 선택하였다. 해당 관측소에 대한 강우자료를 수자원 종합정보 홈페이지에서 획득하였다.

나) 습윤전선에서의 모관흡수력

Morel-Seytoux 등(1996)은 van Genuchten의 함수특성곡선식을 이용하여 습윤전선에서의 모관흡수력을 다음과 같이 제안하였다.

$$\psi_{mf} = \frac{0.046m + 2.07m^2 + 19.5m^3}{\alpha(1 + 4.7m + 16m^2)} \quad (4.17)$$

여기서, α , m , n 은 van Genuchten의 함수특성곡선식의 맞춤 변수

다) 초기체적함수비

초기함수비는 선행강우, 기후, 식생 등에 따라 변하기 때문에 그 값을 예측하기는 매우 어렵다. 하지만 강우 후 지반의 함수비는 계속 감소하는 것이 아니라 일정한 값을 유지하게 된다. 이를 지반의 보유능이라 하며 본 연구에서는 이를 초기함수비로 가정하였다. Colman(1947)은 실내 실험을 통하여 지반의 보유능은 함수특성곡선에서 모관흡수력이 1/3기압(33.33kPa)일 때의 체적함수비임을 밝혔다. van Genuchten의 함수특성곡선식과 위의 관계를 이용하면 초기함수비는 다음과 같다.

$$\theta_o = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (33.33\alpha)^n} \right]^m \quad (4.18)$$

여기서, α : 공기함입치와 관련된 곡선맞춤변수

m : 높은 모관흡수력 범위에서 곡선 기울기와 관련된 곡선맞춤변수(=1-1/n)

n : 함수특성곡선의 변곡점에서 기울기와 관련된 곡선맞춤변수

θ_s : 포화 체적함수비(m^3m^{-3}), 그리고 θ_r : 잔류 체적함수비(m^3m^{-3})

라) van Genuchten 함수특성곡선식의 맞춤 변수

불포화 지반의 함수특성을 구하기 위해서는 많은 시간과 비용이 들어가게 된다. 따라서 기본적인 물성값들로부터 함수특성을 구하기 위해 많은 PTF들이 제안되어 왔으며 그 적용성이 평가되어왔다.

Rawls and Brakensiek (1989)는 van Genuchten의 함수특성곡선과 Brooks and Corey의 함수특성 곡선에 들어가는 맞춤변수를 구하기 위해 다음과 같은 PTF를 제안하였다.

$$\begin{aligned}
h_b = & \exp(5.3396738 + 0.1845038\text{clay} - 2.48394546\theta_s - 0.00213853\text{clay}^2 - 0.04356349\text{sand}\theta_s \\
& - 0.61745089\text{clay}\theta_s + 0.00143598\text{sand}^2\theta_s^2 - 0.00855375\text{clay}^2\theta_s^2 - 1.282 \times 10^{-5}\text{sand}^2\text{clay} \\
& + 0.00895359\text{clay}^2\theta_s - 7.2472 \times 10^{-4}\text{sand}^2\theta_s + 5.4 \times 10^{-6}\text{clay}^2\text{sand} + 0.5002806\theta_s^2\text{clay})
\end{aligned} \tag{6.1}$$

$$\begin{aligned}
\lambda = & \exp(0.7842831 + 0.0177544\text{sand} - 1.062498\theta_s - 5.304 \times 10^{-5}\text{sand}^2 - 0.00273493\text{clay}^2 \\
& + 1.11134946\theta_s^2 - 0.03088295\text{sand}\theta_s + 2.6587 \times 10^{-4}\text{sand}^2\theta_s^2 - 0.00610522\text{clay}^2\theta_s^2 \\
& - 2.35 \times 10^{-6}\text{sand}^2\text{clay} + 0.00798746\text{clay}^2\theta_s - 0.00674491\theta_s^2\text{clay})
\end{aligned} \tag{6.2}$$

$$\begin{aligned}
\theta_r = & -0.182482 + 8.7269 \times 10^{-4}\text{sand} + 0.00513488\text{clay} + 0.02939286\theta_s - 1.5395 \times 10^{-4}\text{clay}^2 \\
& - 1.0827 \times 10^{-3}\text{sand}\theta_s - 1.8233 \times 10^{-4}\text{clay}^2\theta_s^2 + 3.0703 \times 10^{-4}\text{clay}^2\theta_s - 2.3584 \times 10^{-3}\theta_s^2\text{clay}
\end{aligned} \tag{6.3}$$

여기서, h_b : 공기함입치(cm), λ : 간극 크기 지수(pore size index)

θ_r : 잔류체적함수비 (residual volumetric water content, %)

θ_s : 포화체적함수비 (saturation volumetric water content, %) = p (porosity)

sand : sand content(%)(50~2000 μm), 그리고 clay : clay content(%)($<2\mu\text{m}$)

위의 계수들로부터 van Genutchen의 맞춤 변수는 다음이 구할 수 있다.

$$\alpha = 1/h_b \tag{6.4}$$

$$n = \lambda + 1 \tag{6.5}$$

$$m = \lambda/n \tag{6.6}$$

나. 경사도 및 물의 흐름방향

1) 파일의 구성

사면안정해석에 사용된 경사도 및 물의 흐름방향 파일은 slope.dat와 fdr.dat로 되어 있다. 두 파일의 헤드부분은 동일하며 속성부분만 각 셀의 경사도와 흐름방향으로 설정

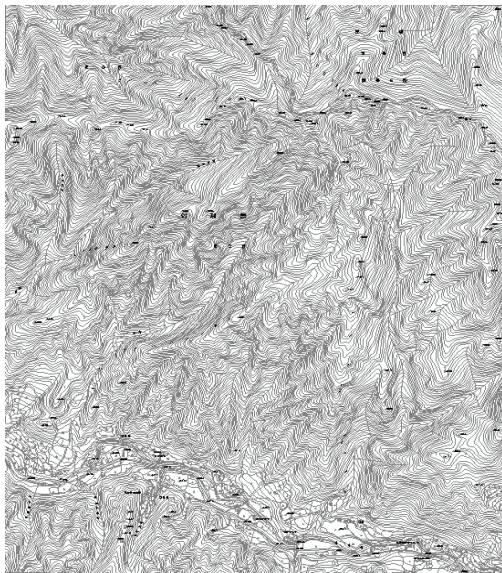
되어 있다. 파일의 헤드부분의 내용은 다음과 같다.

표 6.2 파일 헤드 속성

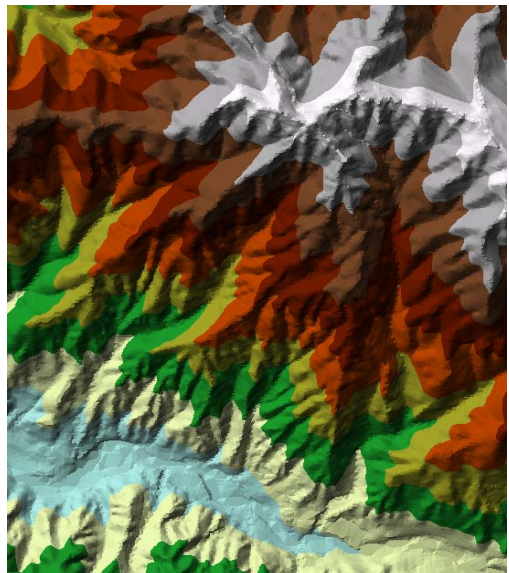
구분	내용
ncols	수치지도의 열 개수
nrows	수치지도의 행 개수
xllcorner	직사각형 수치지도의 왼쪽상단의 좌표값
yllcorner	
cellsize	수치지도 격자 하나의 크기
NODATA_value	수치지도상의 데이터가 없는 셀의 값

나) 변수의 산정

사면 경사도와 물의 흐름방향 파일은 국토지리원에서 제공하는 지형도 수치지도를 가지고 생성한다. GIS 프로그램 상에서 캐드파일로 작성된 수치지도를 통해 TIN을 형성하고 이를 기반으로 DEM을 형성한다. Raster 기반의 DEM자료를 가지고 경사도와 흐름방향을 추출한다. 이를 ESRI사의 ArcToolbox를 이용 ascii파일을 추출해낸다. 본 과정은 그림 6.11, 그림 6.12에 나타냈다.



(a) 수치지도



(b) TIN

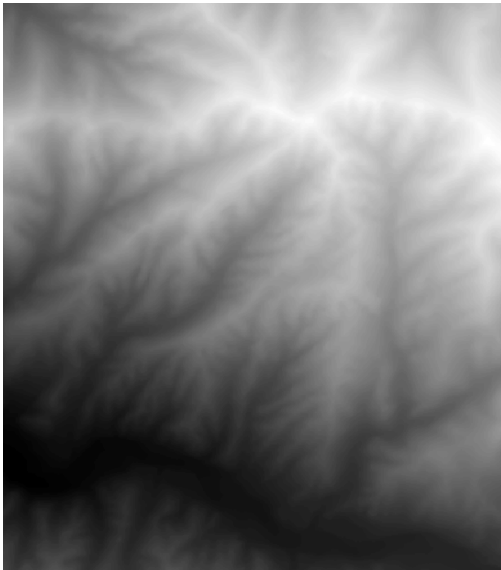


그림 6.13 DEM

그림 6.11 입력자료 추출

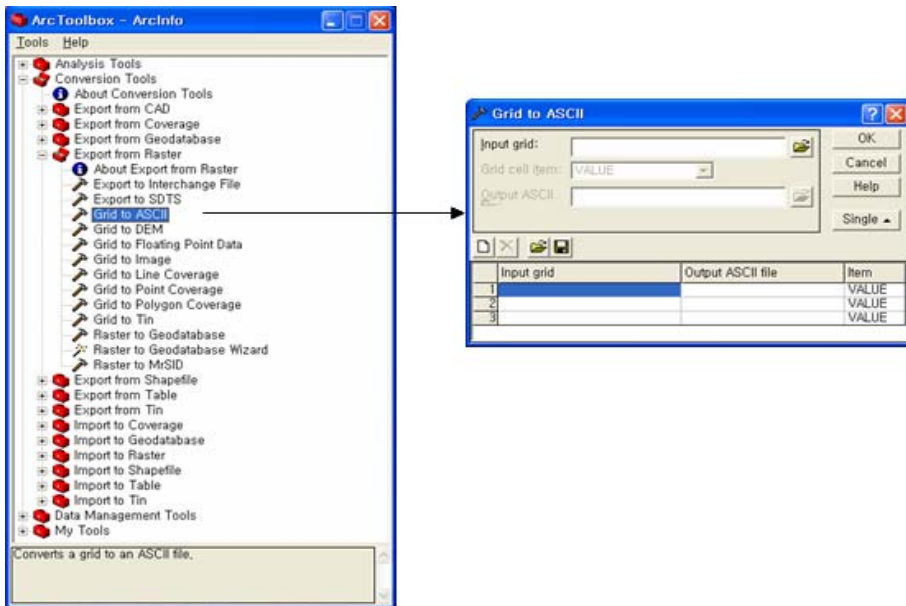


그림 6.12 속성값의 ASCII File 생성

3) 토심산정

사면의 토심은 선행되어진 경사도 파일을 가지고 프로그램 상에서 계산되었다. 산정 방법은 USGS의 방법을 따랐다.

5. 결과 산출

본 프로그램은 시간의 흐름에 따라 포화깊이와 습윤지수를 출력하고 이를 반영한 자연사면 위험도를 출력하게 된다. 출력파일은 ASCII파일 형식이며 ArcToolbox를 이용 layer파일을 생성할 수 있다.

각 시간대 별 자연사면 위험도 도시를 통하여 불안정한 지역을 예측할 수 있다.

6. 결론

본 절에서는 자연강우사상을 반영하는 침투모델과 지표하 흐름을 모사할 수 있는 개선된 알고리즘을 사용하여 간단한 입력 자료의 구축으로 광역적인 범위에 적용할 수 있는 사면안정성 평가 프로그램을 개발함으로써, 강우시 사면의 산사태에 대한 위험 가능성을 결정론적으로 해석해 내고자 하였다.

그 결과 입력값의 설계를 통하여 프로그램에 반영할 수 있었으며 입력 데이터를 바탕으로 비정상상태를 가정한 침투모델과 지표하 흐름을 반영하는 프래그램이 개발되었다. 본 프로그램은 시간별 강우강도를 반영할 수 있으며 시간의 흐름에 따른 침투율 지표하 흐름을 산정하여 사면안정도를 표현할 수 있다.

제 4 절 요약 및 결론

본 장에서는 광역산사태 위험성도를 작성하고 예측하기 위하여 지리정보시스템을 이용하여 산사태 예측 모델을 구동시키기 위한 데이터베이스를 구축하고, 사면별 안전율 지도와 소유역별 안전율 지도를 작성하였다. 또한 본 연구에서 개발된 수정된 침투와 지표하 흐름 모델의 적용하여 광역적인 범위의 사면안정성 평가 시스템을 구축하고 대상지역에 적용하여 대상지역에서 실제 발생한 산사태와의 비교를 통해 실효성을 검증하였다. 그 내용은 다음과 같다.

- ① 프로그램에 필요한 기초자료로 수치표고모델, 토양도, 토심분포도 등을 수집 하였으며 및 산사태 위치를 파악하였다. 유역경계추출에 필요한 데이터는 실험이나 현장 계측 그리고 이미 구축되어 있는 데이터를 바탕으로 ArcGIS를 이용해 데이터베이스화하여 산사태 예측 모델을 위한 자료를 구축하였다.
- ② 자연강우사상을 반영하는 침투모델과 지표하 흐름을 모사할 수 있는 개선된 알고리즘을 사용하여 간단한 입력 자료의 구축으로 광역적인 범위에 적용할 수 있는 사면안정성 평가 프로그램을 개발하였다. 위험성 평가 프로그램 개발을 위한 입력 자료로 식생의 영향을 반영한 토질정수, 함수특성, 지형인자 등으로 구축하였으며 구축된 자료를 이용하여 토심을 산정하고 강우강도에 따른 침투와 지표하 흐름을 분석하여 습윤지수를 산정하였다. 또한 시간 따른 흐름의 영향을 분석하기 위하여 각 시간마다 산정된 습윤지수를 반영하여 산사태 위험성 평가를 실시하도록 프로그램을 설계하였다.
- ③ 자연강우사상을 반영하는 침투모델과 지표하 흐름을 모사할 수 있는 개선된 알고리즘을 사용하여 간단한 입력 자료의 구축으로 광역적인 범위에 적용할 수 있는 사면안정성 평가 프로그램을 개발하였다. 그 결과 입력값의 설계를 통하여 시간별 강우강도를 반영할 수 있으며 시간의 흐름에 따른 침투율 지표하 흐름을 산정하여 사면안정도를 표현할 수 있다.

제 7 장 재해 예측 지역에 대한 대안 제시

제 1 절 서론

지난 수 십 년간 한국은 각종 산업의 발달과 이에 따른 인구의 도시집중화, 구조물의 대형화 그리고 대규모의 도로망 확충사업이 이루어짐으로써 토지이용의 효율을 높이기 위해 자연사면을 절취하거나 원 지반을 매립하여 부지를 확보해 왔다. 따라서 자연사면 절성토면 근교에 주거하는 인구가 증가하면서 사면붕괴가 발생로 인한 인명피해가 빈번하게 발생하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 피해를 경감시키기 위하여 사면붕괴 방지대책공법들이 시행되고 있다.

사면붕괴 방지를 위한 기존의 공학적 대책공법들은 선진국에서 개발되고 활용되는 것들이다. 다시 말해 지역적인 차이 즉, 국가에 따라 지반 및 사면붕괴 발생 특성이 다르다는 점이 고려되지 못한 채千篇일률적으로 사면붕괴방지 대책공법들이 적용되고 있다. 사면붕괴 방지대책 공법을 적용할 경우, 기존의 대책공법들 중에서 대상지역의 지질학적, 지형학적인 특성 및 지반공학적 특성을 고려하여 가장 효과적인 공법을 선택하여야 한다.

본 장에서는 각 지역의 지형과 기후의 특성에 맞춘 공법의 선정을 위해 재해, 이른바 사면붕괴에 대한 방지대책 공법을 알아본다. 그러기 위한 연구의 일환으로 현재 활용되고 있는 사면붕괴에 대한 방지대책 공법과 해외에서 사용되고 있는 사면붕괴 방지대책 공법들을 일본, 미국, 홍콩의 사례를 중심으로 분석한다. 또한 사면붕괴방지 및 사면안정을 위한 신공법을 분석한다. 나아가 지역과 그 지역에서 발생 가능한 산사태 특성을 고려하여 사면붕괴 방지 공법의 적용 가능성을 검토한다.

제 2 절 사면붕괴 방지대책공법

1. 개요

사면붕괴 방지대책 공법은 기능별로 안전율 유지법과 안전율 증가법으로 구분 할 수 있다. 안전율 유지법(사면보호공법)은 현재 비탈면의 안전율이 소요 안전율을 만족시키는 위치에서 우수나 융설수에 의한 표면침식과 공기중 노출에 의한 풍화작용으로 안전율을 감소가 우려되는 경우, 비탈면 보호를 위한 피복공, 블록공 및 표층안전공법과 지중에 침투한 물을 배수시키는 배수공법 등이 있다. 안전율 증가법(사면안정공법)은 비탈면 절취로 사면의 소요 안전율이 확보되지 못하는 구간에 사면구배를 완만하게 조정하거나 옹벽공, 말뚝공, 앵커공 등의 보강공법 개념으로서 보강재를 이용하여 불안정한 비탈면의 안전율을 증가시키는 방법이다.

2. 사면안정공법

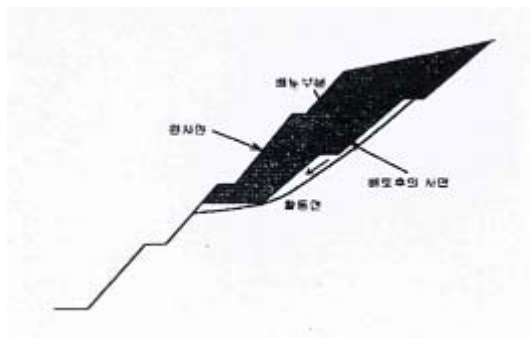
현장조사 등에 의하여 붕괴가능성이 확인된 절개면은 적절한 보강대책이 마련되어야 하는데, 보강대책은 크게 두 가지 종류의 방법으로 이용될 수 있다. 하나는 절개면 활동에 대한 저항력을 증가시키는 공법으로 말뚝, 앵커, 옹벽 등을 사용하여 이들 재료의 전단, 휨, 인장, 압축 등의 역학적 특성을 이용하는 물리적 방법과 지반 안정 약액을 사용하여 직접 지반의 강도를 증가시킴으로서 절개면 활동에 저항하도록 하는 화학적 방법을 들 수 있다. 활동력 감소법으로는 절개면 상부의 흙을 제거시키거나 절개면의 경사를 보다 완만하게 변경시키는 절취공 등을 들 수 있다.

가. 사면경사조정 (경사완화공법)

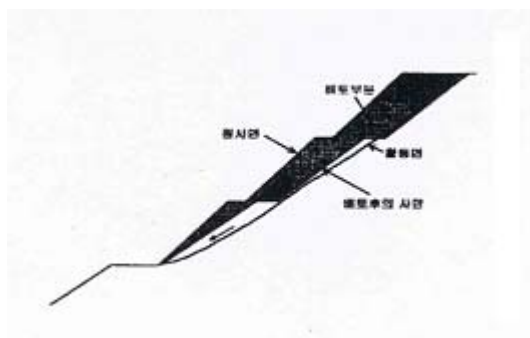
구배를 변화시키는 방법은 우리나라에서 적용되고 있는 사면붕괴 방지대책 중 상당히 많은 부분을 차지하고 있는데, 계단식 절토를 병행한 사면경사조정법이 가장 많이 적용되고 있다.

사면경사조정법은 그림 7.1과 같이 활동이나 붕괴가 예상되는 사면을 미리 절취하여 사면경사를 안식각 이내로 유지함으로써 붕괴위험을 없애거나 활동력을 감소시켜 사면의 안정을 꾀하는 공법이다. 이 공법은 부지에 여유가 있을 경우 사면 안정을 위한 가장 확실한 공법이라고 할 수 있다. 또한, 절토고가 상당히 높은 대절토부에서는 계단식 절토를 함께 적용하는데, 이는 강우나 용수 등이 사면을 유하하는 경우, 유수의 흐름을

약화시키고, 사면 전체의 안정성을 증대시키기 위하여 적용하는 방법이다. 그러나 인접 지역에 구조물이 위치하여 부지를 확보할 수 없는 경우에는 용지 보상 및 굴착량 증가로 인한 공사비 증대 등의 문제가 대두될 수 있으므로 사전에 충분한 조사를 하여 구배를 결정하여야 한다. 그리고 본 공법은 시공이 간편하다는 장점이 있으나, 자연훼손이 심한 단점이 있다.



(a) 사면경사 전면조정



(b) 사면경사 부분조정

그림 7.1 사면 경사조정

나. 록 볼트 (Rock Bolt) 공법

록 볼트 공법은 그림 2.2와 같이 다양한 절리, 단층대 점토 및 전단 파쇄대의 블록이 조합되어 있어 썩기활동이 예상되거나, 암반이 뜬 상태로 있어 이를 기반암에 고정시키는 경우, 그리고 주향이 사면경사와 비슷하여 절리의 평면활동 및 낙반이 우려되는 구간에 적절한 대책공법이다. 파쇄가 심한 암반에서 앵커의 지압판 설치가 곤란할 경우에는 앵커의 두부를 띠장으로 연결하는 방법을 채택하며, 록볼트의 두부는 풍화되지 않도록

록 처리를 해야 한다.

본 공법은 시공장비가 경량이고 공사비가 적게드는 장점이 있으나 록 볼트의 길이를 짧게 제한적으로 시공해야 되는 단점이 있다.

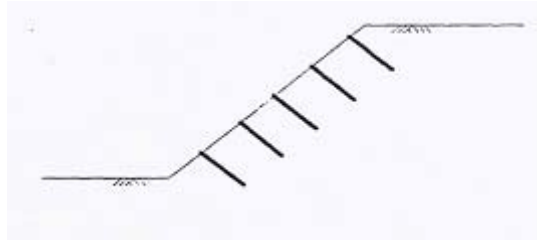


그림 7.2 록볼트 공법

다. 앵커 (Anchor) 공법

Anchor 공법은 그림 7.3과 같이 고강도 강재를 앵커재로 하여 보링(Boring)공내에 삽입하고 그라우트(Grout) 주입을 실시하여 앵커재를 지반에 정착시킨 후 고강도 강재에 프리스트레스를 가함으로써 앵커재 두부에 압축력이 작용하는 공법으로서 사면의 안정 및 활동 억지 목적으로 적용된다. 이 공법은 앵커재 두부에 작용하는 하중을 정착 지반에 전달하여 구조물과 원지반을 일체화할 수 있고, 이로 인해 사면의 안정성을 도모하는 방법이다. 앵커공법은 고강도 강재를 사용하여 프리스트레스를 가함으로써 정착된 구조물에 하중이 작용하는 경우에 구조물의 변위를 감소시킬 수 있는 장점이 있으며, 비교적 작은 굴착공에도 고강도 앵커강재를 인장재로 사용하기 때문에 경제적 효과를 기대할 수 있다.

본 공법은 추가적인 사면절취가 곤란할 경우 적용이 가능한 장점이 있으나 현장 사정에 따라 천공작업이 곤란한 문제점이 있다.

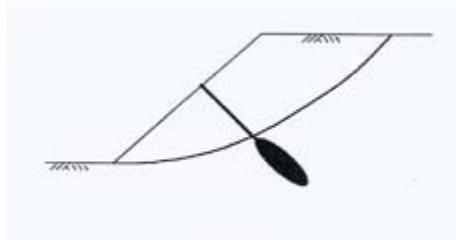


그림 7.3 Anchor 공법

라. 쏘일 네일링 (Soil Nailing) 공법

Soil Nailing 공법은 그림 7.4와 같이 사면을 단계별로 굴착하면서 지반내에 천공을 한 후 강봉과 같은 보강재를 설치하고, 슛크리트 등으로 굴착면을 보호함으로써 원지반의 전단저항력을 증가시켜 사면의 활동을 방지하는 공법이다. 이 공법은 절토사면의 안정대책 외에도 토류벽, 터널보강, 기존 구조물 보강 등 광범위한 용도로 적용되고 있다. Soil Nailing은 굴착면 및 절취사면을 보강할 목적으로 사용되는 공법이다.

본 공법은 시공장비가 경량이고 영구구조물에 적용가능한 장점이 있으나, 공사비가 비싸고 공기가 길다는 단점이 있다. 또한 현장에 따라 천공작업이 곤란한 문제점이 있다.

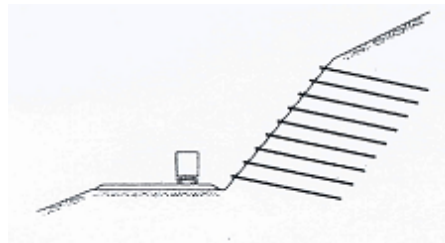


그림 7.4 Soil nailing 공법

마. 역지말뚝 공법

역지말뚝 공법은 그림 7.5와 같이 사면에 콘크리트 말뚝, 강관 및 H형강 말뚝 등을 설치하여 이로 인한 활동 역지효과에 의해 활동 토괴에 역학적으로 저항하는 공법이다. 역지말뚝공법을 적용함에 있어서, 토괴에 의한 활동력에 대하여 말뚝이 전단 및 휨에 대하여 안전해야 하며, 아치(Arch)효과 등을 고려하여 말뚝 설치간격 등을 결정하여야 한다. 따라서 이 공법의 설계에는 전문적 지식을 근거로 별도의 검토가 수행되어야 한다.

본 공법은 대사면의 보강시에 효과적인 장점이 있으나, 공사비가 비싸고 시공장비가 중량인 단점이 있다. 또한 현장에 따라 천공작업이 곤란한 문제점이 있다.

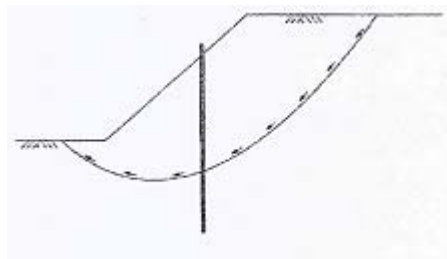


그림 7.5 억지말뚝 공법

바. Crib Wall 공법

Crib Wall 공법은 그림 7.6과 같이 콘크리트 블록을 조립하여 벽체를 세운 다음, 콘크리트 블록의 내부에 토사를 채워 중력식 옹벽과 같이 만드는 공법이다. 본 공법은 벽체를 콘크리트 블록과 블록을 조립하여 시공함으로써 콘크리트 블록과 블록 사이의 틈으로 조경할 수 있는 특징이 있다.

본 공법은 블록과 블록사이의 틈으로 식생이 가능하므로 환경친화적인 장점이 있으나 공사비가 비싸며 공기가 길다는 단점이 있다. 또한 절토구간의 경우 지반 앵커 등의 추가적인 보강조치가 필요하다는 문제점이 있다.

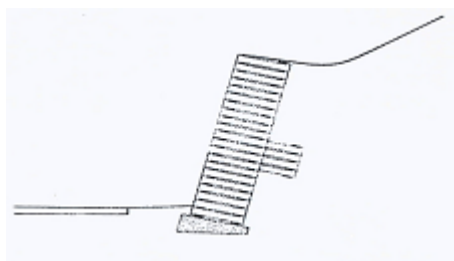


그림 7.6 Crib wall 공법

사. 그라우팅 공법

그라우팅 공법은 그림 7.7과 같이 절개면 내에 주입재를 주입하여 불안정한 부분의 안정도를 향상시키고 지하수나 침투수의 유입을 막아 절개면이 불안정화 되는 것을 방

지하는 공법이다. 주입공법에 사용되는 주입재는 시멘트계(입자식 그라우트), 시멘트약액계(입자용액그라우트), 약액계(용액그라우트)로 크게 나눌 수 있으며, 이 중 시멘트 그라우트계가 가장 취급이 용이하며 신뢰성이 높고 경제적이다.

주입을 할 경우에는 보통 보링공을 통해서 지반 내로 압입하지만, 주입압을 지나치게 높이면 지반이 파쇄되고, 안정도를 저하시키거나 구조물 등을 변형시키는 경우가 있으므로 주의해야 한다. 재료는 현장여건을 충분히 고려하여 선정하여야 한다. 또, 주입한 재료가 피압수나 지하수, 침투수 등에 의해 흘러가지 않도록 해야한다. 따라서 효과적인 주입을 위해서는 그라우트 종류, 주입압, 균열의 크기와 양, 목적, 경제성 등을 고려한 후 신중하게 실시해야 한다.



그림 7.7 그라우팅 공법

아. 콘크리트 버팀벽(Buttress)

콘크리트 버팀벽은 그림 7.8과 같이 절리가 많은 암 절개면에서 콘크리트 블록공이나 틀공, 숏크리트 공법 등으로 절개면 대책이 충분하지 않다고 판단되는 경우에 시공하는 공법으로 절개면 표층부에 직접 콘크리트를 타설하는 공법이다.

특히 암 탈락 등이 발생하여 절개면 상에 빈 공간이 생기게 되면 절개면 하부의 지지력을 상실하게 되어 또 다른 암 탈락이 발생할 위험이 커지므로 이를 방지하기 위하여 빈 공간에 콘크리트 버팀벽을 설치하여 절개면의 안정성을 높이는 공법이다.

콘크리트 버팀벽의 가장 큰 기능은 절개면 상에서 약대(Weak Zone) 및 위험암블록 등을 지탱해 주고 절개면 하부 및 도로로 탈락하는 것을 방지하는 것이다.

일반적으로 절개면 경사도가 1:1 정도의 완만한 경우에는 무근 콘크리트를 사용하지만 경사도가 1:0.5 정도로 급한 경우에는 철근 콘크리트를 사용한다. 이때 콘크리트 두께는 보통 20~30cm 정도로 한다.

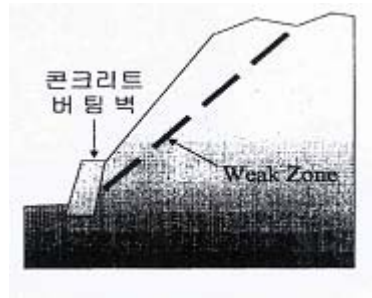


그림 7.8 콘크리트 버팀벽

자. 토목섬유 보강공법

최근 들어, 사면붕괴 방지대책의 일환으로 도로 제방이나 성토 사면에 고분자 합성제품이 토목섬유(Geosynthetics)를 이용하여 사면을 보강하는 사례가 늘어가고 있다. 토목섬유를 이용한 사면보강공법은 사면의 정상 혹은 선단에서 사용가능한 공간의 제공 및 성토량의 감소, 그리고 토목섬유가 보강효과로 인하여 역학적으로 다소 미흡한 성토재 가용 등의 장점이 있다. 따라서 사면 경사를 급하게 시공할 경우나 파괴된 사면의 복구 시 지반을 보강할 목적으로 이와 같은 토목섬유 보강공법이 적용되고 있다. 또한, 토목섬유 보강공법은 새로운 도로 제방을 건설하거나, 기존의 제방을 확장할 경우에도 효과적으로 적용할 수 있는 공법이다.

토목섬유를 이용한 사면보강에는 주로 지오그리드(Geogrid), 지오텍스타일(Geotextile), 지오셀(Geocell) 등의 제품이 사용되고 있으며, 최근에는 지오투브(Geotube)가 개발되어 수해로 인한 사면의 복구 또는 해안에서의 사면보호 목적으로 적용되고 있다.

차. 배수공법

지반활동이 일어나는 곳이나 절개면 등에 있어서 물의 영향은 대단히 크다. 물은 지반의 강도를 저하시켜 절개면 활동을 촉진시키기 때문에 절개면의 안정에 큰 영향을 미친다. 따라서 물의 영향을 받지 않도록 강구하는 것이 절개면의 안정을 유지시킬 수 있는 방법 중 하나이며, 배수공은 직접적인 대응방법이다.

배수공법은 물이 지하로 침투하지 않도록 방지하는 방법과 절개면에 침투한 물을 배수시키는 방법으로 크게 나누어지며 전자를 지표수 배수공, 후자를 지하수 배수공이라 한다.

배수공은 절개면 활동 억제공법으로서 활동 억제효과를 발휘하지만 배수파이프가 절개면 구성입자의 침전물 등으로 채워지게 되면 본래의 목적을 달성할 수 없다. 그러나 배수파이프를 토목섬유(부직포 등)로 감음으로서 토사이동에 의한 파이프구멍(strainer) 막힘 내지 파이프내 토사 유입을 최소화 할 수 있다. 따라서 배수공은 안전율 증가법의 보조공으로 사용되는 것이 바람직하다.

1) 지표수 배수공법

지표수 배수공법은 절개면 상부자연사면에 콘크리트 U형 수로 등의 배수구를 설치하여 강우나 강설에 의한 지표수의 절개면 내 침투를 방지하여 절개면 내 간극수압 상승을 차단하거나 절개면으로 지표수의 흐름을 차단시켜 절개면의 침식을 방지함으로 절개면의 붕괴를 방지시키는 것으로 지하수 배수공에 비해 싸고 용이하다. 구체적 방법으로는 배수로 내기와 침투수방지공법이 있다.

2) 지하수 배수공법

지하수 배수공법은 절개면 내에 있는 용수 또는 지하수를 지표로 유도하여 배수시켜서 절개면의 간극 수압 및 함수비를 낮추어 절개면을 안정시키는 공법으로, 절개면의 깊은 곳에 있는 지하수를 보링공법에 의해 배수관으로 배수시킨다. 여기에는 얇은 층 또는 깊은 층의 지하수를 배수하기 위해 수평보링을 하는 수평배수공, 집수정을 설치하여 주변에 존재하는 여러 깊이의 지하수를 우물로 모아 배수하는 집수정공, 그리고 활동면의 깊은 지반활동의 경우나 규모가 큰 경우에 배수터널을 이용하는 방법 등이 있다.

3. 사면보호공법

일반적으로 절개면의 안정성을 다룰 때 안전율이 1 이상인 경우를 안정하다고 판단하며, 이때 우수의 침식이나 침투를 방지하거나 혹은 절개면의 풍화 방지를 주목적으로 하는 것을 보호공법이라고 말한다. 즉, 인공사면인 절개면의 보호뿐만 아니라 사람의 손이 닿지 않은 자연사면에 대해서도 우수에 의한 지표의 침식을 방지하고 우수가 지표에서 지하로 침투하지 않도록 하며 또한 노출된 암반 절개면에서 암반이 풍화를 일으켜 불안정하게 되는 것을 막기 위한 공법을 절개면 보호공법이라고 한다. 보호공법의 또 다른 주된 역할은 주변 자연환경이나 경관과 조화를 이루게 하고 이를 보전하는 것이다. 일반적으로 공사비, 미관 등의 측면에서 고려해 볼 때, 식물에 의한 보호공법이

바람직하다고 할 수 있지만, 공사기간 토양, 사면의 구매, 용수 상황 등으로 인해 식물에 의한 방법이 곤란할 경우에는 돌, 콘크리트 등을 이용한 구조물에 의한 보호공법이 적용되고 있다. 절개면 보호공법의 구체적인 종류와 각각의 특성은 다음과 같다.

가. 식생공법

식생공법은 절개면을 식생에 의해 피복함으로써 우수에 의한 침식 방지를 목적으로 하는 절개면 보호공법의 하나이다. 본 공법은 풍화가 심하게 진행된 풍화암층이나 토층에 주로 적용되며 주변 환경과 조화를 이루는 장점이 있기 때문에 절개면 보호공법 중에서 보편적으로 사용되는 공법이다. 본 공법의 종류로는 씨앗살포(Seed Spray)공법, 매트(Mat)공법, 네트(Net)공법 등이 있다.

식생공법은 살아있는 식생을 취급하는 공법이다. 따라서 설계 단계에서 시공방법이나 순서가 틀리면 소기의 목적이나 목표를 거두기에 많은 어려움이 있으며, 또한 잘못된 시공의 경우 주변경관을 해치게 되는 문제점을 가지고 있으므로 설계단계에서 식생공법의 종류와 특성을 면밀히 검토해야 한다. 식생공법의 설계시 일반적으로 고려해야 할 사항은 식생 뿌리에 의한 보강, 식생 하중에 의한 절개면 하중 재하, 토층의 수분 조절, 나뭇잎의 강우차단과 발산작용에 의한 간극수압의 감소, 줄기와 덩굴로 인한 지지와 흩아치현상으로 수평구속에 의한 절개면 내의 응력 균형에 미치는 영향 등을 들 수 있다.

또한 여러 가지 요인에 의한 흙의 침식성은 절개면의 불안정성을 유발하는 인자이므로 설계할 때 반드시 고려되어야 한다. 식생공법이 단독으로 절개면 붕괴방지를 위한 대책으로 사용되었을 때 소기의 목적을 기대하기 어려우며, 시공된 식생이 쇠퇴하거나 지역에 부적합한 종류라면 침식방지나 환경보전의 목적은 달성되지 않는다. 따라서 보강공법과 병용하거나 유지관리가 필요한 경우도 발생한다.

1) SF(Soil Folck) 자연표토복원공

본 공법은 훼손된 자연표토를 복원하기 위해 개발된 환경친화적인 생태복원녹화기술로서 균열이 있는 암반, 경질토사, 리핑암, 산성토 및 특수토 등 녹화가 곤란한 지역에 대해서 식물의 생육에 가장 적합한 고차원의 단립구조를 지닌 자연표토를 재생하는 공법이다. 또한 다양한 결합(유기결합, 이온결합, 물리결합)으로 내침식성이 있는 생육기반을 조성하여 다양한 자연식물 군락의 복원이 가능하고 목본 식생의 뿌리가 얽혀서 지반을 강하게 고정하고 지지하기 때문에 절취사면의 생태복원형 녹화공법으로서 가장 효과적인 공법이다.

2) 텍솔(Texsol) 녹화토공

본 공법은 연속장섬유를 인공토양에 혼입시켜, 이를 암반표면에 취부하면 풀과 나무 뿌리의 역할을 함으로써 표면의 유실과 붕괴를 방지함은 물론 식물을 비옥하게 생육할 수 있는 녹화기반을 조성하는 녹화공법이다. 본 공법은 경사에 관계없이 적용할 수 있으며, 배수성이 좋고 인장강도가 크다.

3) Coir Net

Coir Net에 의한 보호공법은 씨앗의 발아와 활착에 매우 효과적인 공법이다. 이 공법은 내구성이 강한 코코넛 껍질과 황마줄기에서 추출한 섬유로 짠 네트인 Coir Net를 이용하여, 사면의 지반 정리가 끝난 후, 그 지역의 기후에 적합한 종자를 선택하여 Seed Spray 방법에 의해 포설한다. Coir Net 공법은 법면 구배에 제한이 없고 시공이 간단하며 보수가 용이할 뿐만 아니라, 환경 친화적인 효과도 기대할 수 있어서 도로변의 절개 사면에서 많이 적용되고 있으나, 최근에는 발아율의 저조 및 세굴 등의 문제점으로 대두되고 있다.

나. 구조물에 의한 보호공법

식생에 의한 보호공법만으로는 사면의 안정성을 확보할 수 없을 경우에, 구조물에 의한 보호공법을 고려한다. 일반적인 토사 사면인 경우에는 강우시 또는 설빙기에 사면 내부로 침투한 물의 작용으로 인하여 안정성을 잃고 붕괴되는 예가 많다. 이 때, 사면의 표면보호가 식수, 파종 등의 식생공법으로 보호되고 있다고 하더라도 사면 내에 존재하는 침투수의 작용으로 토피가 힘의 평형을 잃고 붕괴하게 되므로, 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 적절한 구조물로써 사면을 방호하는 보호공법이 적용되고 있다.

1) 블록붙임공, 돌붙임공

블록붙임공, 돌붙임공은 절개면의 풍화 및 침식방지를 목적으로 점착력이 없는 토사, 토단, 무너지기 쉬운 점토 등으로 구성된 1:1 이상의 완경사 절개면에 사용된다. 이 공법은 콘크리트 틀공법과 병용되어 시공되는 경우도 있으며, 특히 배수문제에 유의해야 한다. 따라서 용수가 많은 곳은 배수공 수를 늘린다.

2) 블록쌓기공, 돌쌓기공

블록쌓기공은 일명 돌쌓기 공법으로 돌을 절개면 표층부에 쌓아서 절개면을 보강시

키는 공법이다. 최근에는 돌 대신 값이 싸고 일정한 규격에 맞추어 공장 제작이 가능한 콘크리트 블록이 많이 사용된다. 이 공법은 절개면의 경사도가 1:1 보다 완만하고, 점착력이 작은 토사 등으로 구성된 절개면에 주로 적용된다.

3) 프리캐스트 틀공법

본 공법은 절개면 표면 침식방지 및 저항력 증대를 위하여 사용되며, 토사 유동이 심한 토질의 경우나 식생공법만으로 절개면 보호가 충분하지 못한 경우 등에 식생공의 병용공법으로 많이 사용된다. 국내에서는 격자 블록 등의 명칭으로도 사용되며 재료에 따라서 강재, 플라스틱, 콘크리트의 세 종류가 있다. 강재나 플라스틱을 이용하여 제작된 경량틀은 원형, 사각형, 다각형 등의 다양한 형태를 갖추고 있으며 틀의 표면에 많은 구멍이 있어 식생공을 병용하여 시공할 경우 식생의 뿌리가 근접부의 틀까지 옮겨 성장하므로 보강효과를 높일 수 있다.

4) 뿔어붙이기 틀공법

뿔어붙이기 틀공법은 절개면에 형틀을 설치하여 모르타르 또는 콘크리트로 뿔어붙이기를 시공하는 공법이다. 형틀로는 주로 철망이 많이 사용되지만, 철판, 내수성 골판지 등이 사용되는 경우도 있다.

뿔어붙이기 틀공법은 절개면 상부로부터 단계적인 시공이 가능하므로 붕괴되기 쉬운 절개면이나 규모가 큰 절개면 등에 있어서도 안전하게 시공할 수 있다. 또 틀의 강도가 비교적 크기 때문에 표층붕괴 등에 대해 어느 정도의 역지력을 기대할 수 있고 틀과 지형이 밀착되어 있기 때문에 침식 등에 강한 장점이 있다.

5) 콘크리트 블록공

본 공법은 용수가 있는 절토사면이나 구배가 급한 성토사면에서 현장 여건에 의해 식생이 부적당한 경우, 혹은 식생을 하여도 표면이 붕락할 염려가 있는 경우에 사용되고 있다. 일반적으로, 틀은 현장타설 콘크리트 또는 프리캐스트 콘크리트 제품 등을 사용하고 있으며, 틀의 교점 부분에는 활동방지말뚝 또는 철근 등을 설치한다. 틀 안에 양질의 흙을 되메우고 식생을 하는 것이 기본적인 방법이기에는 하나, 사면의 구배가 급하거나 용수가 상당히 많을 경우, 또는 양질의 흙을 얻을 수 없을 때, 식생만으로는 유실될 염려가 있을 경우에는 틀 안에 호박돌을 채워 시공하기도 한다.

6) 프레임 공법

프레임 공법은 공장에서 변형이 가능한 거푸집과 철근을 일체화한 프레임을 제작하고 이것을 지반에 앵커 등을 이용해 고정시킨 후 콘크리트 또는 모르타르를 프레임 내에 뽑아서 철근 콘크리트의 격자를 완성하는 공법이다.

7) 편책공

편책공은 앞에서 언급한 식생공으로 큰 면적을 가지는 사면을 보호할 경우, 식생이 완전히 발육할 동안 사면을 보호할 목적으로 적용되는 공법이다. 이 공법은 식생이 되어 있는 사면에 나무말뚝을 박고 여기에 쇠가지나 대나무 등을 엮어서 일종의 흙막이 역할을 할 수 있도록 설치하는 방법이며, 이러한 공법을 통하여 식생의 발육을 촉진하는 부식토층의 형성, 강우로 인한 사면의 토사 유출 방지, 그리고 낙석 방지 등의 효과를 기대할 수 있다.

8) 들망태공

들망태공은 급류 하천의 독비탈 보호, 사면의 용수가 존재하여 토사의 유출의 염려가 있는 경우, 그리고 침투수로 인해 붕괴된 사면의 복구 등에 많이 적용되고 있는 공법이며, 사면의 보호와 동시에 배수효과도 기대할 수 있다.

다. 솟크리트공법

솟크리트 공법은 절개면 표층부의 침식을 방지하고 지표면 배수를 유도하는 것이 목적이며, 압축공기를 이용하여 시멘트, 모래, 물이 혼합된 모르타르를 절개면 표층부에 피복하는 공법이다.

원래의 활용 목적은 암 절개면의 낙석방지를 위하여 주로 사용되었으나 최근에는 적용범위가 넓어져 자갈질 사면에도 많이 사용되고 있다. 다만 용수가 많은 절개면에 시공하는 경우, 시공 표면에 균열이 발생하거나 부분 탈락이 생기는 등의 단점이 있으므로 배수공을 설치하여 수압의 영향을 줄여주어야 한다.

시공방법에는 건식공과 습식공이 있으며, 시공방법상 큰 차이는 없으나 건식공은 분사 직전에 노즐 끝 부분에서 물과 혼합하여 분사되고, 습식공은 재료와 물이 혼합된 모르타르를 분사하는 방식으로 운반거리가 건식공에 비해 짧고 분사가 가끔씩 끊어지는 경향이 있다.

라. 낙석방지공법

낙성방지공법의 종류 및 특징은 표 7.1과 같다.

표 7.1 낙석방지공법

공법	특징
밑다짐공	비탈면상의 부석, 전석이 구르거나 미끄러지지 않도록 부석등의 기반이나 주위의 비탈면상에 고정시키는 방법
면정리	낙석의 위험이 있는 부석이나 전석을 잘게 쪼개거나 제거 또는 비탈면내의 안전한 장소로 모아서 정리하는 경우에 사용
록볼트 및 록앵커공	비탈면상에 있는 큰 부석과 전석을 기반암까지 천공하여, 이 속에 록볼트 및 록앵커를 삽입해서 비탈면상에 고정시키는 공법
와이어로프 걸이공	부석이나 전석이 구르거나 미끄러지지 않도록 격자 모양으로 와이어로프나 수개의 로프 등을 사용하여 그 기초를 덮거나 걸어서 비탈면상에 고정시키는 경우에 사용
낙석방지망공	구조물에 의한 비탈면 보호공을 하지 않은 암석 또는 자갈 혼입 토사의 땅깍기 비탈면 등에 우수에 의한 세굴로 인해 낙석이 예상되는 곳에 사용
낙석방지울타리	낙석방지 울타리는 장대 절토 비탈면 등에서 지진 또는 집중호우 등으로 낙석하는 경우에 방지망 만으로는 공용중의 교통에 현저한 영향을 미칠 것으로 판단되는 위치에 사용
낙석방지옹벽	비탈면구배가 완만하고 도로측방의 여유가 있을 경우 토사나 낙석을 퇴적시킬 수 있도록 옹벽을 설치하는 공법

제 3 절 해외의 사면붕괴 방지대책

1. 개요

1830년대 영국과 프랑스에서는 철도와 제방을 따라 발생할 수 있는 사면붕괴 위험에 대한 방지대책의 시도가 진행되었다. 그러나 그 당시의 사면붕괴 방지대책은 사면 앞부분에 대한 보강이나 지하수 배제공법에 편중되어 있었다. 한편, 1900년대 산업혁명이 도래하면서 많은 토공장비들이 생산되고 이로 인한 장비들의 대형화, 다양화가 진행되면서 활동사면전체의 제거나 변형 및 보강이 가능하게 되었고, 약 10년 전부터는 GEOMembrane이나 Goetextile과 같은 토목섬유가 사면보강에 있어서 중요한 위치를 차지하게 되었다. 또한 전술한 바와 같이 각 국가의 기상 및 지반 특성 등에 따라 사면붕괴 방지대책 공법 중 가장 적용성이 높은 방법들이 각 국가별로 발달하게 되었다. 본 절에서는 사면붕괴 방지 대책 공법을 적용하고 있는 많은 국가들 중, 특히 일본, 미국, 그리고 홍콩의 경우에 있어서의 사면붕괴 방지대책 공법 현황을 조사, 정리하였다.

2. 일본

일본열도는 환태평양 지대의 일부이고, 지질학적으로 매우 불안정하며, 열도전체가 몬순(Monsoon)지대에 속하므로 많은 비가 내린다. 특히, 우리에게 내리는 폭우와 태풍 등으로 크고 작은 사면붕괴가 발생하여 많은 피해를 겪고 있는 실정이다.

1960년대 이래로 일본은 국가 정책의 일환으로 토지 이용을 극대화시켰다. 이로 인해 인적이 드문 산악지대와 해안지역까지도 개발이 이루어져 사면붕괴의 위험에 많은 사람들이 노출되게 되었다. 대표적인 예로, 1982년 7월에 집중폭우로 인한 나가사키주변의 토석류 사태와 1985년 7월에 나가노시에서 발생한 지즈키야마 산사태, 그리고 1995년 1월 효고 지진에 의한 대규모 산사태 등을 들 수 있다. 이러한 사건은 도시지역에서의 사면붕괴 발생에 대한 위험성과 사면붕괴 방지대책에 대한 관심을 불러일으키게 되었다.

일본의 경우, 사면붕괴 방지대책은 사면활동을 중지 또는 경감시킴으로써, 발생할 수 있는 피해를 최소화할 목적으로 시행되고 있으며, 사면붕괴의 원인과 활동 메커니즘에 따라 표 7.2와 같이 구분하고 있다.

표 7.2 일본의 사면붕괴 방지대책 공법

구 분	산사태 방지대책 공법		
억제공법	지표수 배수조절 공법		
	지하수 배수조절 공법	천층 지하수 배수조절 공법	지하수 차단공법, 횡보링공법, 암거공법
		심층 지하수 배수조절 공법	집수정 공법, 배수터널
	배토공법		
	Buttress Fill 공법		
억지공법	말뚝공법		
	대구경 현장타설 말뚝 공법		
	앵커 공법		
	토류벽 공법		

일본에서는 표 7.2과 같이 사면붕괴 방지대책을 억제공법과 억지공법으로 구분하고 있다. 억제공법은 직접적으로 사면활동에 영향을 미치는 지질특성, 지하수위 등과 같은 사면의 특성에 변화를 주어 사면붕괴를 방지하는 방법이고, 억지공법은 직접적으로 사면붕괴 방지를 위한 구조물을 설치하는 방법을 뜻한다. 현재 일본에서 많이 사용하고 있는 억제공법으로는 지표수 배수조절공법, 지하수 배수조절공법, 배토공법, Buttress Fill 공법 등이 있고, 억지공법으로는 말뚝공법, 대구경 현장타설 말뚝 공법, 앵커공법, 토류벽 공법 등이 사용되고 있다.

3. 미국

미국에서는 지난 70년 동안 사면붕괴 방지대책 공법에 대한 연구를 AASHTO, FHWA, FEMA, TRB, NAVFAC 등과 같은 기관에서 진행해 왔다. 그러나, 엘리뇨와 같은 기상이변으로 인한 집중강우가 과거 몇 년 동안 미국 전체를 휩쓸며 있으며, 이러한 집중강우로 인한 사면붕괴로 많은 인명 피해가 발생하였다. 그 대표적인 예로, 1993년 1월과 2월에 걸쳐 발생한 캘리포니아주 애너하임의 산사태와 1994년 Los Angeles 남서쪽에서 발생한 Northridge 산사태, 그리고 캘리포니아주 Yosemite 산사태 및 네바다 산사태 등을 들 수 있다. 이렇듯 큰 산사태 발생에 비하여 미국에서의 초기 사면붕괴 방지대책 공법은 다른 국가 등과 마찬가지로 부벽설치, 지표수 또는 지하수의 제거 등에만 주안점을 두고 있었다. 그러나, 건설기술의 고도화와 건설장비의 대형화 추세에

발맞추어 사면붕괴 발생 사면 전체에 대한 보다 적극적인 대책 마련에 몰두하게 되었고, 지난 10년 전부터는 지오멤브레인(Geomembrane)이나 지오텍스타일(Geotextile) 등과 같은 토목섬유(Geosynthetics)가 사면붕괴 방지대책의 일환으로 사용되게 되었다. 현재, 미국에서 사면붕괴 방지대책으로 사용되는 공법은 크게 4개의 범주로 요약할 수 있다.

가. 절토 및 성토

절토와 성토를 이용한 산사태 방지대책은 1830년대 프랑스와 영국에서 철도를 따라 발생한 산사태의 복구 및 방지대책 일환으로 활발하게 사용되었다. 미국에서도 이를 적용하여 산사태 방지를 위하여 절성토를 실시하고 있다.

나. 지지 구조물

지지 구조물에 의한 방법은 전 세계적으로 가장 많이 사용되는 사면붕괴 방지대책 공법 중의 하나이며, 이는 중력식 구조물(Gravity Structure), 켄틸레버식 구조물(Cantilever Structure), 연성벽체 또는 격벽(Flexible/Bulkhead Walls), 앵커 및 볼트(Anchor and Bolt), 그리고 혼합형 구조물(Combination Structures) 등의 5가지 분야로 나뉘어진다.

중력식 구조물에 의한 방법은 사면에 작용하는 하중에 대해 구조물이 자중으로 저항하는 원리를 이용한 방법이며, B.C 2900년경 아시리아인과 이집트인들이 사용했을 정도로 오래된 사면붕괴 방지대책 공법이다.

켄틸레버식 구조물은 석축, 철근 콘크리트 옹벽, L형 옹벽, 현장타설말뚝 또는 케이슨을 병용한 구조물, 그리고 H-pile 벽체 등 여러 종류의 켄틸레버 구조물을 이용한 사면붕괴 방지대책 공법이다. 특히, 켄틸레버식 구조물의 종류 중 말뚝에 의한 방법을 적용할 경우 대구경의 오거(Auger)를 이용하면 단단한 토사층이나 연암까지도 말뚝을 타입 할 수 있는 장점이 있다.

미국에서는 사면붕괴 방지대책 중의 하나로 연성벽체 또는 격벽 형태의 구조물을 적용하기도 한다.

국내와 마찬가지로 미국에서도 흔히 적용되는 사면붕괴 방지대책 공법 중의 하나는 앵커 또는 볼트와 같은 지지 구조물에 의한 방법이다. 앵커 또는 볼트를 이용한 사면붕괴 방지대책 공법은 천공 장비와 지반의 천공 가능 여부에 따라 공법 적용 시 시공성과 비용이 좌우된다.

다. 지하수 배수

사면붕괴 발생을 유발하는 가장 큰 인자 중의 하나는 사면 내에 존재하는 지하수라고 할 수 있다. 따라서 사면 내에 존재하는 지하수를 제거함으로써 사면활동을 억제할 수 있다. 그러나 점착력이 없는 흙이나 소성이 큰 점토의 경우에는 시간이 경과함에 따라 배수관을 폐색시킬 가능성이 있으므로, 이러한 지반에 배수공법을 적용할 경우에는 중장기적인 관점에서 충분한 검토와 계획 수립이 이루어져야 한다.

라. 토목섬유를 이용한 보강

최근 들어 대두되는 환경 보존 또는 공비 절감 차원에서 자연 혹은 인공사면의 경사를 급하게 시공해야 할 경우가 많이 있다. 이러한 경우에는 사면의 역학적 안정성이 문제시되므로 사면의 활동과피를 피하기 위한 적절한 조치를 취하여야 한다. 사면보강 측면에서 다층의 지오그리드(Geogrid) 또는 지오텍스타일(Geotextile)을 시공 중에 포설함으로써 사면의 안정성을 확보할 수 있다.

보강사면에서는 사면의 경사를 급하게 시공할 경우나 파괴된 사면의 복구시 지반을 보강할 목적으로 토목섬유(Geosynthetics)를 보강재로 사용한다. 이러한 경우에 있어서 토목섬유는 사면의 정상 혹은 선단에서 사용가능한 공간 제공, 성토량 감소 등의 경제적 이점을 제공한다.

4. 홍콩

홍콩에서 발생하고 있는 사면붕괴는 종류가 다양하고, 발생빈도도 매우 높은 것으로 알려져 있다. 이러한 사면붕괴는 토피의 두께, 붕괴시간, 붕괴이동정도, 토석류의 흐름 등의 측면에서 차이점을 보이고 있다. 홍콩에서 발생하는 사면붕괴의 주요 원인으로서는 집중호우, 포화된 비점착성 점토의 함유, 급경사의 사면, 과도한 산지개발 등을 들 수 있으며, 이 중 집중호우에 의한 사면붕괴 발생이 전체 사고의 대부분을 차지하고 있어 가장 일반적이고 중요한 발생 원인이라 할 수 있다.

홍콩의 연평균 강우량은 약 2,200mm이고, 이 중 80% 이상이 5월~9월 사이의 우기에 집중되는 특징을 가지고 있다. 이러한 집중호우의 원인은 저기압 기단이나 열대성 사이클론에 의해 단시간에 내리는 많은 비 때문인 것으로 알려져 있다.

홍콩에서 발생한 대표적인 사면붕괴의 예로써는, 1972년 6월 18일 홍콩섬의 Mid-Level 지역에서 발생한 산사태와 1976년 8월 및 1982년 5월에 발생한 산사태를 들 수 있으며, 특히 1982년 5월의 산사태 발생 시에는 3,200mm의 강우량을 기록했다. 이

러한 사면붕괴는 많은 인명피해를 유발하였는데, 1972년 6월 18일 홍콩섬에서 발생한 산사태에서는 San Mau Ping 주거지역에서만 71명이 사망하였다. 이 사고의 원인은 주거지역 위의 성토고 35m의 사면이 집중호우(560mm)로 인하여 액상화되어 흘러내린 것이었다.

상기와 같은 홍콩에서의 사면붕괴 발생 특징을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 홍콩의 지형적인 영향을 들 수 있다. 홍콩은 대부분이 구릉성 산지이며, 홍콩섬과 구룡반도에는 자연평지가 거의 없다는 지형적인 특징을 가지고 있다. 그리고 홍콩의 지형구배는 전체의 60%이상이 15° 이하로 이루어져 있다.

둘째, 사면붕괴가 발생하기 쉬운 지형적 특성을 들 수 있다. 즉, 자연사면, 절·성토사면, 암반절개사면, 옹벽 중 인명 및 재산에 중대한 피해를 발생시키는 대부분의 사면붕괴는 절·성토사면이나 옹벽 등 자연적으로 생성된 사면이 아닌 인공적으로 조성된 사면에서 발생한다는 점이다. 특히, 홍콩에서는 많은 옹벽들이 설치되어 있음을 볼 수 있는데, 이러한 옹벽들은 석재와 같은 재료를 사용하여 이론적인 안정성 해석없이 축조된 것이 대부분이며, 이렇게 축조된 옹벽 앞뒤에는 또 다른 옹벽들이 설치되어 그 최종고가 8층 건물높이에 이르는 것도 있다.

셋째, 홍콩 내의 “Squatter”라고 불리는 불량 무허가 주택 밀집지역을 들 수 있다. 불량 무허가 주택 밀집지역의 가구 수는 약 50만에 이르는 것으로 추산되며, 대부분이 경사가 가파른 곳에 나무로 집을 축조하여 거주하고 있는데, 이 지역의 사면은 배수시설이 제대로 설치되어 있지 않음으로 인해 작은 사면붕괴 발생 시에도 많은 인적·물적 피해를 입을 수 있는 가능성이 내재되어 있다.

과거 홍콩은 사면붕괴에 대해 크게 관심을 갖지 않았다. 그러나 전술한 바와 같은 1972년의 대규모 산사태를 겪은 후, 산사태에 대한 인식을 크게 바꾸게 되었으며, 1976년 산사태 피해 보고서에서는 사면붕괴 및 사면관리를 위한 특별담당부서 설립을 제기하였다. 1977년 7월 GCO(Geotechnical Control Office)라고 하는 정부 차원의 담당 부서를 설립하였고, 1991년 GEO(Geotechnical Engineering Office)로 개명하여 현재까지 홍콩의 사면개발 및 국토이용과 관계되는 모든 업무를 수행하고 있다. 현재, GEO에서는 홍콩에서 발생하고 있는 산사태의 주요 원인을 토사사면에서의 강우에 의한 지하수위 상승, 암반사면에서의 절리에 의한 전도, 그리고 기타 지형적인 특성으로 인한 급경사 등으로 규명하고 있다. 상기와 같은 발생 원인에 대하여 홍콩에서 적용하고 있는 원인별 사면붕괴 방지대책 공법은 표 7.3과 같다.

표 7.3 홍콩의 산사태 방지대책 공법

구분	산사태 방지대책 공법
지하수 차수 및 지하수위 저하	Chunam 공법
	수평 배수공법(Horizontal Drain)
	케이슨 배수공법(Caisson Drain)
전도방지	Rock Bolt or Rock Anchor 공법
	낙석 방지용 방호책
급경사지에 대한 구조적 보강	Caisson Retaining Wall 공법

가. Chunam 공법

Chunam 공법은 홍콩에서 오래전부터 사용되어 온 사면붕괴 방지대책 공법으로써, 홍콩에 존재하는 대부분의 사면이 Chunam 공법으로 시공되어 있다. 이 공법은 흙, 석회, 그리고 시멘트를 혼합하여 인력을 이용, 흙손으로 사면 표면을 피복하는 공법이며, 시공이 간편하고 경제적인 장점이 있는 반면, 시간이 경과함에 따라 사면 표면에 균열이 발생하는 단점을 가지고 있어 일정기간마다 보수 작업을 필요로 한다.

최근 들어 환경친화적인 공법이 요구됨에 따라 이 공법은 점차 사라져가고 있으나, 홍콩 현장의 기술자들에게는 이러한 Chunam 공법이 사면붕괴 방지대책 공법으로써는 가장 효과적이라는 인식이 아직도 많이 자리잡고 있는 실정이다.

나. 수평 배수공법

수평 배수공법은 주로 강우 시 사면 내에 침투한 지하수의 수위 저하를 목적으로 적용되는 공법이다. 이와 같은 목적을 가진 공법으로는 Caisson Drain 공법이 있으나, 수평 배수공법과는 배수방법에 있어 다소 차이가 있다. 수평 배수공법은 사면을 수평으로 천공한 후, 여러 개의 배수 파이프를 부채살 모양으로 설치하는 공법이며, 신속하고 경제적이라는 장점으로 인해 홍콩에서의 사면붕괴 방지 대책으로 많이 사용되고 있다.

다. 케이슨 배수공법

케이슨 배수공법은 앞서 언급한 수평 배수공법과 같이, 강우 시 사면 내에 침투한 지하수의 수위 저하를 목적으로 적용하는 공법이지만, 수평배수공법과는 달리 유입된 지하수를 수직방향으로 배수한다는 특징이 있다. 케이슨 배수공법에서 일반적으로 직경 1.0m~1.5m 정도의 원통형 케이슨이 사용되며, 완전히 인력에 의해서만 시공된다. 이

공법은 인력 굴착을 통해 시공되기 때문에 육안에 의한 지층 확인이 가능하고, 배수위치 결정이 확실하다는 등의 장점이 있다.

라. Rock Bolt 및 Ground Anchor 공법

Rock Bolt 및 Ground Anchor 공법은 주로 암반사면에 적용되는 공법이며, 홍콩의 암반사면은 대부분 Rock Bolt와 Ground Anchor로 보강되어 있다. 이러한 Rock Bolt 및 Ground Anchor 공법을 적용할 때에는 설치 간격과 길이를 결정하기 위한 Bolt 및 Anchor의 인발 저항력, 그리고 부식 문제 등을 충분히 고려하여야 한다.

마. 낙석 피해방지를 위한 방호책

낙석 피해방지를 위한 방호책은 일반적으로 사면의 지형이 불규칙하거나, 표면이 거친 경우 소규모 낙석에 의한 피해를 사전에 방지하기 위하여 적용되는 공법이다. 방호책의 기초는 소구경 말뚝으로 시공하고, 펜스는 철망 외에 철제 보강재와 Wire Rope를 이용하여 보강하는 경우가 많으며, 이중 펜스를 설치하기도 한다.

바. 케이슨 토류벽 공법

교통량이 많은 도로의 주변지역이나 주택가 밀집지역에서는 토지 이용의 효율을 증대시키기 위해 일반적으로 급경사의 사면 공사가 실시된다. 이러한 경우에는 사면 전체를 하나의 큰 구조물로 고려하여 이에 대한 사면붕괴 방지대책 공법을 수립하는 것이 일반적이다. 이 때, 주로 적용되는 공법이 케이슨 토류벽 공법인데, 이 공법은 지하연속벽(Diaphragm Wall)과 시공 원리가 유사하다는 특징을 가지고 있다. 케이슨 토류벽 공법은 대부분 케이슨 배수공법, 수평 배수공법 등과 병행하여 사용되는 경우가 많다.

제 4 절 사면붕괴 방지대책 신공법

1. 개요

과거에는 산면붕괴를 방지하기 위한 대책공법의 시행은 사면안전을 향상이 주목적이었다. 하지만 대책공법시행으로 인하여 환경파괴가 야기된다는 문제점이 제기되었다. 따라서 현재 새로 개발되고 있는 사면붕괴 방지대책 공법들은 효율적인 사면 안전을 향상뿐만 아니라 친 환경적인 공법의 개발이 주류를 이루고 있다. 본 절에서는 현재 개발되고 있는 신공법들의 소개에 그 목적이 있다.

2. H-beam을 이용한 사면보강기법

가. H-beam을 이용한 사면보강원리

일반적으로 절개지 사면의 대책공법은 보호공법과 보강공법으로 구분할 수 있는데, 보호공법은 절개지 사면이 자체적으로 안정한 상태에서 외부의 사면붕괴 발생요인을 차단하는 방법인데 반해, 보강공법은 사면자체가 안정하지 못한 상태에서 강제적인 조치를 취하여 사면의 안정성을 확보하는 방법이다.

따라서 보호공법과 보강공법은 어떠한 연계성은 없다고 할 수 있다. 그러나 H-beam을 이용한 사면보강공법은 일종의 사면보호공법의 일종으로 H-beam 강재들과 그 안에 식생이 가능한 식생 블럭을 결합하여 사면표층부에 식물의 생육을 유박시켜 식물뿌리에 의한 구속력으로 흙의 결속을 증대시키고 표층수의 유입을 억제시켜 흙의 침식, 건조 및 동상 등의 피해를 경감시키는 물론, 활동과괴 가능성이 있는 불안정한 사면에는 H-beam 강재들을 지압판으로 활용하여 어스앵커나 쏘일네일 등과 결합하여 시공할 수 있어, 기존의 버트리스옹벽과 같이 미관상 발생할 수 있는 거부감을 줄여줄 수 있는 친환경적 사면보호·보강공법이라 할 수 있다.

나. 공법 특징

이 공법은 위험 절개면의 여건에 따라 사면보강(앵커나 네일, 록볼트 등) 및 보호공법(녹화, 낙석방지망 등)과 다양하게 결합하여 시공이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 사면절취 시 비용절감 및 공사기간이 짧으며, 녹생토 및 Seed Spray, 자연식생 등과 같은 친환경적 공법으로의 전환이 쉽다.

공법의 특징 및 효과는 다음과 같다.

- 구배완화공법, 절토공법을 대체할 수 있어 경제적이다.
- 블록공 적용으로 우수에 의한 사면침식을 방지할 수 있다.
- 표면 그라우팅 효과로 지표수 침투를 방지할 수 있다.
- 기존 옹벽공법(계단식, 의지식 옹벽 등)을 대체할 수 있다.
- 녹화 블록이 옹벽 거푸집을 대체함으로써 시공이 간편하고 경제적이다.
- 앵커, 쏘일 네일링, 록볼트 등 보강공법과 연계하여 시공할 수 있다.
- 사면형태나 지반조건에 구애받지 않고 적용 가능하다.
- 표면형상이 불량한 사면 또는 기복이 심한 사면을 복원하여 반듯한 사면을 형성할 수 있다.
- 블록에 의한 녹화로 친환경적이며 미관이 수려하다.
- 식생에 필요한 수분공급 및 저장기능이 우수하여 안정적인 녹화상태를 유지할 수 있다.
- 사면안정 및 보호, 녹화 등 복합적인 기능을 함으로써 영구적인 사면 안정성을 확보할 수 있다.

다. 연계 가능한 주요 공법

- H-beam 전면판 +록앵커/록볼트 +녹화공법
- H-beam 전면판 +쏘일네일 +녹화공법
- H-beam 전면판 +앵커/네일 +낙석방지망 +녹화공법

3. Multicone Nailing 공법의 사면보강공사 적용

현재 국내의 산사태 지역이나 비탈면에 적용되는 Sliding방지공사는 쏘일네일링공법, 락앵커공법, 어스앵커공법등이 주로 이용되고 있다.

이들 공법 중 국내외에서 시공되고 있는 쏘일네일링 시공현장에서 인발시험을 한 결과, Nail과 Grout재와의 마찰력이 항복강도 보다 적게 나타나고 Grout재와 원지반과의 마찰력보다도 적게 나타나는 결과를 얻는 경우가 많다. 그래서 이를 보강하기 위해 Multi-cone nailing 공법을 개발하였다.

Multi-cone Nailing 공법은 역 원추형의 콘을 Nail에 장착시켜 삽입함으로써 쏘일네일링이 갖지 못한 마찰력을 증대시키고 인발력을 증가시켜 사면안정성을 보다 확보하기 위한 공법이다.

4. 고강도 텐션네트를 이용한 사면보강공법

절토사면의 경우 대기 중에 장기간 노출 시 풍화가 급속히 진행되어 표층부에서의 암괴나 토사의 슬라이딩이 발생하는 경우가 많으며, 특히 절리나 균열이 심하게 발달되어 있는 사면은 네일링이나 락볼트 등으로만 보강을 실시할 경우 각 네일이나 락볼트 설치지점 사이에서 슬라이딩이 일어날 수 있어 점진적으로 파괴가 진행될 가능성이 크다. 이의 보완책으로 슛크리트 등에 의한 표면처리공이 실시되어 왔으나 이는 배면공극수에 의한 탈락의 가능성이 있으며 미관이 불량하여 친환경적인 보강공법의 필요성이 대두되고 있는 실정이다. 근래에 이르러 와이어 메쉬와 와이어 로프네트를 이용한 사면보강공이 적용되고 있다.

최근에는 이를 한 단계 발전시킨 특수공정처리 부재, 즉 고인장 강도를 지닌 텐션네트를 사면에 밀착, 프리텐션닝으로 표면의 응력을 강화하고 네일 또는 락볼트로 지반의 전단강도를 제고시켜 강선메쉬-네일간의 힘을 상호 접선 이동시킴으로써 전체사면을 일체화하는 고강도 텐션네트공법이 있다.

5. Nailing system을 추가한 산사태 억지벽체공법

산사태 억지벽체(Slide Suppressor Walls)는 콘크리트 판넬(Panel) 및 drilled shaft 등으로 구성된 지중(embedded) 구조체이며, 미국 텍사스지역에서 주로 집중호우 및 동결융해현상 등의 영향을 쉽게 받아 얕은 파괴(Shallow failure)가 발생하는 연약한 점성토지반 사면의 보수에 적용되어 왔다.

이러한 산사태 억지벽체공법에 Nailing system을 추가한 새로운 형태의 사면보강공법이 제시될 수 있다. Nailing이 추가됨으로써 토압감소효과가 더 커지는 효율성이 있으며, 특히 사면의 경사도가 급해질 수록 Nail에 의한 보강효과가 증가한다.

이 공법의 구체적인 시공개요는 다음과 같다.

- ① 터파기
- ② 굴착 및 케이싱 작업
- ③ 두부보강 콘크리트 타설
- ④ 철근설치 및 콘크리트 타설
- ⑤ 콘크리트 판넬 설치
- ⑥ soil nail 설치
- ⑦ 되메움

6. 강화 Soil-Nailing

쏘일네일링 공법의 문제점을 보완한 사면보강방법으로 수평배수공을 길게 설치하여 유요응력의 증대효과와 네일을 시공하여 전단응력에 대한 견보기 점착력 증가에 따른 저항력의 증대를 기대할 수 있으며, step wedge의 이용으로 인장력을 증대시킨다.

표면처리는 금속지압판과 PVC 코팅철망을 네일 두부에 완전 결속시킨 후 표면녹화(인공객토) 또는 Shotcrete로 처리한다.

강화 Soil Nailing 과 기존 Soil Nailing의 차이점은 표 7.4에 나타내었다.

표 7.4 강화 Soil Nailing 과 기존 Soil Nailing의 비교

구분	강화 soil nailing	soil nailing
장·단점	<ul style="list-style-type: none"> • step wedge를 네일에 장착하여 부착력 및 마찰력 증대 • 그라우팅은 저압으로 천공홀의 파쇄대 및 절리면 충전이 가능 • 시공이 간단하여 품질확인이 쉬움 • 토공의 최소화 작업이 가능 • 경제적이며 유지보수가 간단 • 붕괴된 사면을 원상태로 복구, 복원가능 • 일체형 간격재 사용으로 부자재 공내중심부 위치로 전단력 및 마찰력이 향상 	<ul style="list-style-type: none"> • 일반적으로 쓰이는 공법 • 간격재(spacer)를 견고하지 못한 플라 스틱 제품을 사용하여 삽입 설치 시 파손의 우려 • 파손 시 주입호스의 이탈로 인한 그라우팅의 문제점 발생 및 간격재의 역할인 네일의 천공홀 중심부 설치불가하므로 부착응력 저하의 우려 • 슛크리트를 이용한 전면판 시공 시 미관상의 문제
두부 정착 방법	<ul style="list-style-type: none"> • wedge nut 사용으로 지압판 체결의 확실성 및 지반거동에 대처 용이 • Nail 본체에 일체식 정착으로 자재관리 및 시공이 간단 • Nail 본체와 지압판이 일체가 되어 외부충격에 대한 저항이 크고, 변형이 적어 유지관리가 용이 	<ul style="list-style-type: none"> • 부품으로 분리된 라이너스크류 이용 • Nail 본체와 부품으로 분리되어 자재관리 및 시공이 복잡 • 사면과 지압판이 밀착되지 못하여 수동저항력이 적음 • Nail 본체와 지압판이 유격되어 움직임이 있어 외부충격시 지압판 등이 탈락
배수관	<ul style="list-style-type: none"> • 유공관과 S다발관을 복합 구성하므로 토압에 강하며 막힘이 없어 영구배수 가능 • 환경친화적 인공객토 및 향토 초목분류 녹화로 주변 경관과의 친밀성을 기함 • 천공 심도 확인이 용이 • 자재관리 및 시공이 용이 • 반영구로 사용되며 시공 후 7~8년 정도에 배수관 내부청소로 기능이 완전 회복되므로 유지관리가 용이 	<ul style="list-style-type: none"> • 일반 S형 다발관 • 시공 1~2년후 토사 퇴적으로 기능이 급격히 저하 우려되며, 유지관리가 어려움 • 천공 심도 확인 불가 • 소규모 자재 묶음으로 자재관리 및 시공이 어려움 • 배수기회복을 위한 배수관 내부청소가 불가능(재시공이 불가피함)

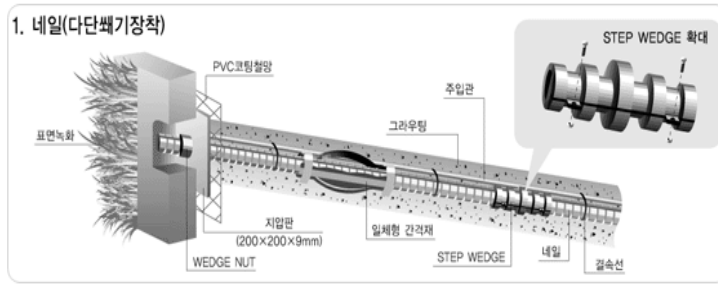


그림 7.9 강화 Soil Nail의 형태

7. 네일합벽 식생옹벽

지반을 절취 후 네일을 이용한 지반보강을 실시하여 겉보기 점착력을 증가시키고, 수평배수공을 길게 설치하여 심층수를 배제시켜 유효응력을 증대시킴과 동시에 전면에 네일과 철근을 결합조립하여 철근콘크리트 옹벽을 설치하는 공법.

옹벽하단에 소규모의 화단을 조성하여 관목류나 넝쿨류의 초화류 등을 식재하여 친 환경적인 효과를 발휘한다.

주요 특징은 다음과 같다.

① 시공성 우수

단계별 굴착 후 네일시공, 옹벽타설 등으로 시공속도가 빠르며 네일과 옹벽이 일체로 거동되는 구조물로 안정성이 우수하다

② 안정성 확보

네일링으로 굴착면에 대한 지반을 보강함으로써 겉보기 점착력이 증가, 수평배수공을 길게 설치하여 심층수를 배제시켜 유효응력의 증대를 기하게 되어 굴착면에 대한 안정성을 확보하게 된다..

③ 경제성 우수

옹벽 설치 시 터파기, 되메우기 등 토공작업의 최소화, 가시설 설치 최소화, 시공기간의 단축 등으로 경제성이 우수하다.

④ 옹벽의 시공높이 & 구배

L형 옹벽이나 역T형 옹벽보다 시공높이의 제한성이 없고 현장여건에 따른 시공이 가능하므로 최대 수직으로도 절취가 가능해 유연성이 크다.

⑤ 굴착토량의 최소화

네일을 이용하여 토압을 지지함으로써 옹벽설치에 따른 굴착토량의 최소화

⑥ 환경친화적

옹벽 전면하부에 화단을 조성하여 교목과 넝쿨식물 등을 식재하여 주위환경과 조화를 이루며, 시각적으로 심리적 안정감을 준다.

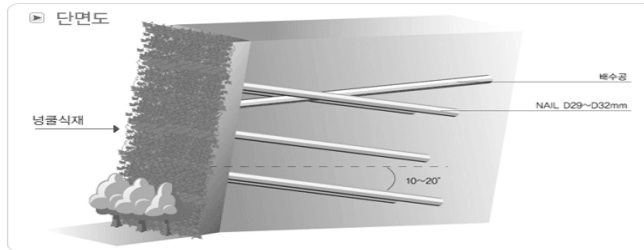


그림 7.10 네일합벽 식생옹벽 단면도

8. Mass Nail 공법

붕괴된 사면이나 불안정 상태의 위험 절개지에 대한 역해석 방법을 이용한 사면보강 시공법으로서 역해석 방법으로 현장조건에 적합한 전단강도 특성을 신속하게 판단하여 조사, 설계 기간의 최소화를 꾀할 수 있다.

주요 특징은 다음과 같다.

- ① 소형장비를 이용하므로 긴급상황 대처가 용이하고, 영구 복구를 한다.
- ② 현장상태로 보강이 되므로 토공 작업이 최소화되어 절취토량을 줄이고 나아가 산림 훼손을 줄일 수 있다.
- ③ 토사, 풍화암, 발파암 구분없이 공히 적용 가능하고 구조물 설치가 최소화 되므로 토지활용의 극대화를 꾀할 수 있다.

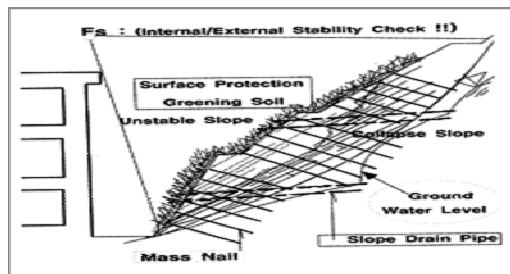


그림 7.11 Mass Nail 공법

제 5 절 사면붕괴 방지 대책공법 적용성 검토

1. 개요

현재 우리나라는 산사태 발생으로 인한 인명 재산피해를 방지하기 위한 대책공법이 채택 적용되고 있다. 산사태 예방공법은 대상지역의 지질학적, 지형학적 및 지반공학적 특성에 따라 다르게 적용되기 때문에 국가나 지역에 따라 기상특성, 지반특성 및 산사태 발생기구 특성이 달라질 수 있다. 따라서 각 지역의 특성에 적합한 대책공법 개발의 필요성이 대두되고 있다. 산사태 예방공법의 기존 공법의 한계성 극복을 위한 새로운 공법을 시도하거나 시대적 관점의 차이로 공법 선정에 영향을 미치게 된다. 종래의 산사태 예방공법으로는 경사면을 식물이나 블록으로 피복하여 강우에 의한 세굴을 방지하는 소규모의 공법이나 사면의 구배를 완만하게 하는 공법이 많이 사용되었다. 그러나 최근에 이르러서는 이들 공법으로 산사태를 억지시키기에는 한계가 있어 억지말뚝, 앵커, 옹벽 등으로 사면의 저항력을 증대시키는 적극적인 공법이 많이 사용되고 있다. 따라서 새로 개발된 공법의 적용성 검토와 시대적 관점에 맞는 대책공법의 개발 및 선정이 중요하다.

본 절에서는 기존 산사태 예방공법의 선정을 위하여 산사태 분류별 특징을 살펴보고 우리나라 사면활동의 특성에 관하여 연구하고자 한다. 또한 산사태 대책공법 선정 시 주의사항을 알아보고 대책공법의 적용성에 관하여 분석하고자 한다.

2. 산사태 분류별 특성

가. 낙석

낙석(落石, Fall)은 절벽이나 절개지 등의 가파른 경사지에서 암반이나 토질이 자유낙하하는 것을 말한다. 낙하하는 재료에 따라서 암석, 토질, 잡석 등의 접두어가 붙기도 하나 낙석의 발생과정은 대체로 대동소이하다.

낙석과 연계하여 몇 가지 관련되는 내용 및 조건은 아래와 같다.

- 근원은 경사지나 절벽에서 독립되어 분리된 지반 구성 재료이다.
- 평면, 썩기, 수직 혹은 계단식의 초기 붕괴면이 나타난다.
- 자유낙하 궤적 중 적어도 일정부분은 자유낙하운동을 동반한다.
- 자유낙하, 이탈, 구르기, 튀어오르기, 미끄러짐이나 건조흐름 등을 동반하며 이러

한 과정 중에 유동화, 액상화, 비점성 알갱이 흐름, 발열 및 전단을 효과 등이 동반된다.

- 이동특성상 속도는 사면하부(foot, 사면말단부)에 도달하기 전 상당히 빠른 특성이 있다.

낙석현상이 발생하는 재료, 크기, 출처 등은 원지반의 종류에 따라 다양할 수 있으며 면상이나 각석의 모양을 가질 수 있다. 또한 낙석은 도로절개지 뿐 만 아니라 해안절벽, 하천제방, 고원지대의 모서리, 자연산지, 급경사면 등에서 발생할 수 있다. 낙석의 구분은 학자에 따라 다양하나 현재 전 세계적으로 가장 널리 사용되는 낙석의 분류는 대체로 지반대료의 근원에 따른 분류이다. Varnes(1978)에 의하면 재료에 따라 rock fall, debris fall, soil fall로 구분하였으며 Whalley(1974)에 의한 좀 더 상세한 구분은 표 7.5에 나타나 있다.

표 7.5 부피에 따른 낙석 구분(Walley, 1974)

낙석의 형태	부피	비고
Debris fall	$<10m^3$	-
Boulder fall	$10\sim100m^3$	보통 몇 개의 각석으로 발생
Block fall	$>100m^3$	큰 각석으로 발생하여 이동 중 소규모로 부서짐
Criff fall	$10^4\sim10^6 m^3$	
Bergsturz	$>10^6 m^3$	상당한 거리까지 이동가능

낙석된 재료가 큰 자갈이거나 부피가 크지 않은 토질이라면 파괴유발요인은 열극이 있는 지역이거나 하부침식 경사면, 혹은 기질이 파괴된 지역이기 쉽다. 하지만 암반에서는 부정합면의 작용이 파괴요인으로 더 큰 중요성을 가지며 절리나 단층은 편상의 파괴면을 유발하고 이들이 교차할 경우는 췌기파괴가 발생하거나 수직 혹은 계단식의 파괴면을 보여주기도 한다. 이렇게 암반내부로 향하는 부정합면을 조사하면 초기파괴를 예측할 수 있으며 상대적인 동적운동을 평가하여 암반의 안정성을 평가할 수 있다. 낙석 후의 암괴이동은 사면의 경사도 및 이동경로에 있는 방해물에 따라 차이가 있으며 지형에도 영향을 받게 된다. 낙석이 반복적으로 발생하면 결과적으로 부채꼴(fan)의 모양새를 사면하부에 형성시키며 암반사면의 안전도에 따라 단시간에 생성되기도 하며 수십년 혹은 수백년의 시간이 필요하기도 한다. 하천에 이러한 장벽이 형성되면 자연적

인 댐이 형성되기 때문에 2차 재해요인으로 특히 위험성이 가중될 수 있다.

협곡에서 대규모 낙석이 발생할 경우 반대편 계곡이 있는 곳까지 낙석된 재료가 이동할 수 있으며 상당한 거리까지 이동이 가능하다. 하지만 이러한 현상은 암반낙석(rockfall)에만 발생하는 것이 아니고 토질 등을 동반한 복합 산사태(complex landslide)에서도 발생할 수 있다. 자유낙하 및 이와 동반한 자유이동이 가능할 때 1차 낙석(primary fall)이라하며 운동에 제한이 발생할 경우 2차 낙석(secondary fall)이라 한다. 튀어 올라 이동하는 거리 등은 여러요인에 영향을 받으며 그 해석은 상당히 복잡한 것으로 알려져 있다(Marie, 1988). 낙석은 영향을 받는 사면의 주향과 경사, 암괴의 크기, 지반의 상태 및 변형 표면 식생의 충격흡수 등에 따라 결정되며 반발 에너지 등의 계산에도 상기 요소들이 포함된다. 최근에는 낙석의 비행거리 등을 분석하는 연구가 진행되고 있으며 예측을 위한 수치계산도 시도되고 있다.

낙석의 원인은 모암으로부터 이미 분리된 재료가 이탈되는 것이다. 이러한 현상의 진행은 시간을 필요로 하며 내부적 요인과 외부적 요인이 복합되어 발생한다. 이탈된 준비가 된 재료는 부정합의 주향과 경사, 그리고 사면의 주향과 경사에 의해 분리가 발생된다(Descoedres, 1988). 지형에서 낙석을 구분할 수 있는 가장 확실한 지표는 색깔인데, 풍화되지 않은 신선한 모암표면은 낙석이 근래에 발생하였다는 사실을 나타내준다. 자연사면에서 구조적으로 발생하는 불안정암괴의 안정성은 일반적으로 열극의 구조선 분석에 기초한 2차원적 해석으로 평가될 수 있다. 다른 사면붕괴재해와 마찬가지로 낙석은 사면구성요소가 중력에 의한 평형을 상실했을 때 발생하며 낙석의 직접적 원인은 아래와 같다.

- 냉동분해 혹은 열분해나 뿌리의 작용 등으로 인한 열극(fissure)의 확장 및 확대. 침투수의 결빙 및 해빙의 의한 작용 등 기후적 요소는 고지대나 고위도 지방에서 특히 두드러짐
- 기계적 파열이나 화학적 풍화에 의한 연결암석(connecting rock)의 이탈
- 돌출경계의 한계초과
- 지진, 폭발, 정수압의 증가 혹은 점토질의 수화작용 등으로 인한 암괴의 마찰역치 정역학적 한계초과
- 포행 등으로 인한 사면 경사의 지속적 변형에 의거한 경사도 증가
- 풍화나 침식에 의한 암괴나 자갈주위의 기질(matrix)상실 등이다.

낙석 사면붕괴에 대한 대비책은 발생가능 장소에 의한 적절한 조사가 선행되어야 가능하다. 이러한 작업은 응용지질학자와 지형학자들의 공동연구로 수행되어야 한다. 최종 결과물은 낙석위험 구역도와 적정 관측시스템을 포함하여야 한다. 1992년 스위스에서는 열극(fissure) 관찰 시스템으로 1억 1천만 m^3 의 낙석을 3시간 전에 예측하여 대피한 사례는 있으나(Noverraz and Bonnard, 1992) 낙석 발생시간에 대한 정확한 예측은 현재 방재기술로는 거의 불가능하며 지속적 관찰에 의해 낙석 진생정도는 파악할 수 있다. 낙석방지와 복구를 위해서는 열극분포, 암반의 부정합면 배열관찰, 암두의 운동안정성, 튀는 정도 등을 먼저 정리하여야 한다. 표 7.6은 낙석의 위험도를 진단할 경우 활용할 수 있는 관찰요소들을 정리하였다.

표 7.6 낙석의 진단 요소

위험요소	관찰가능한 요소
1. 암두의 특성 및 큰 경사, 돌출부(overhanging), 하부침식, 경사면에 가까운 균열 (open cracks close to slope face) 2. 암반구조, 층서면 및 부정합면의 주향 및 경사 3. 충전된 조인트 (Joints lines with soft infillings) 4. 높은 수압 및 해빙(High water pressure or seasonally frozen faces) 5. 침식(Any eroded slope)	1. 흔적의 특성(Nature of scars), 마모된 표면(Polished surface) 2. 토석(Debris), 느슨한 암반(Loose rock), 분리된 자갈(Detached boulder), 언덕이 쌓여진 작은 댐(Valley dam) 3. 사면 구성물질 및 기질의 재분포 (Redistribution of matrix)

나. 전도

전도(顛倒, topple)는 사면과 평지를 중심으로 암반, 잡석, 토질 등의 재료가 회전운동을 하며 파괴되는 산사태를 의미한다. 전도파괴의 최고 정점은 갑작스런 낙석이나 활동으로 나타날 수 있지만, 운동의 형태는 파괴되지 않은 상태에서의 기울어짐으로 판단될 수 있다(Varens, 1978). 전도파괴는 1970년대에 들어와서 과학적으로 분석 및 기술되기 시작하였으며 기울어지는 재료는 전체적으로 동시에 활동하며 기저(base)에서는 사면 쪽으로 이동하나 상부에서는 사면반대쪽으로 회전, 이동, 파괴, 반발, 구르기 등이 발생

한다. 다른 사면붕괴와 마찬가지로 관계되는 재료에 따라 암석, 잡석, 토사 등으로 세분되기도 하나 전도의 발생작용은 유사하다.

전도는 회전운동 및 상호작용기동과 연계하여 파괴가 발생한다. 파괴되는 암괴는 불규칙적인 퇴적면과, 열개(cleavage), 절리(joint), 인장균열(tension crack)이 사면과 평행하게 발달해 있을 경우 특히 자주 발생한다. 이러한 상황은 부정합면이 사면내부로 향해 있는 다른 사면붕괴와는 대비되는 것이다. 기존에 생성된 인장 파괴면을 따라 발생할 수 있으며 침식에 의한 상부하중의 제거가 전도파괴에서는 필수적인 조건이라 할 수 있다. 전도발생시 파괴되는 암괴는 작게는 $1m^3$ 에서 크게는 $10m^3$ 까지 발생할 수 있으며 대규모로 발생하기 위해서는 거의 수직에 가까운 사면이 요구된다. 전도는 석회암이나 편암에서 흔히 발생하나 퇴적토층이 얇게 분포하는 퇴적암이나 수직절리가 발달한 화성암에서 발생할 수 있다. 또한 점토질이 풍부한 토질에서 발생할 수 있으며 굴곡이 있는 사면에서는 부정합면의 경사가 클 경우 전도파괴가 갑자기 발생할 수 있다. 사면에서 전도파괴가 발생할 경우 동반되는 과정은 아래와 같다.

- 하부에 존재하는 탄성재료의 제거 및 약화를 초래하는 점진적인 풍화작용 혹은 침식작용으로 점진적 혹은 급속한 전도발생
- 토질함수량 변화로 인한 점토성분의 부피팽창 및 감소로 점진적 전도발생
- 새로운 침식으로 사면각이 증대되어 상재하중감소로 응력변화를 초래하여 전도발생

수평 절리는 보통 영향이 없으나 인장균열에 의한 급경사지 상부에 형성되는 균열이 직접적인 원인으로 작용할 경우 인장균열전도(tension crack toppling)라 한다. 전도나 병진활동(translational slide)은 하부재료의 풍화 및 짜여져 나오는 현상(squeezing-out)과 소성변형 등에 의해 발생한다. 활동은 사면지형에 따라 높이보다는 넓이가 클 때 발생하며 상대적으로 연성이 있는 지반재료와 동반되는 차이가 있다. 전도와 활동의 구분은 절리암괴의 기하학적 모양에 기초하며 넓이(b)와 높이(h)의 비로 나타낸다. b가 커지면 활동이 발생하며 h가 상대적으로 증가하면 전도가 발생한다. de Freitas와 Watters(1973)는 경사면에 대하여 활동에 의한 미끄러짐이 발생할 것인지 전체적으로 넘어지는 전도가 발생할 지에 대한 기준에 대해 보고하였다. 이들의 공식에 따르면 a가 경사각, f가 마찰각, b/h는 넓이-높이의 비일 경우 관계식은 다음과 같다.

- ① a가 f보다 작고 b/h가 $\tan(a)$ 보다 클 경우 암괴는 안정하다
- ② a가 f보다 크고 b/h가 $\tan(a)$ 보다 클 경우 암괴는 미끄러진다.
- ③ a가 f보다 작고 h/h가 $\tan(a)$ 보다 작을 경우 암괴는 전도된다.
- ④ a가 f보다 크고 b/h가 $\tan(a)$ 보다 작을 경우 암괴는 미끄러지면서 전도된다.

전도가 발생하는 속도에 대한 연구는 전 세계적으로 부진한 실정이다. 속도는 다양한 것으로 판단되며 수천 년간 진행되어 수초사이에 파괴될 수 있는 극단적인 속도개념을 가지고 있다. 천천히 지속되는 전도현상이 반드시 급격한 파괴로 연결되지 않을 수도 있으며 지질과 지형에 따라서는 진행되던 전도가 멈출 수도 있다. 넓이가 커질수록 미끄러지는 활동이 발생할 가능성도 커진다.

전도파괴의 1차 요인은 암괴기둥이 분리되면서 연약한 기저에 하중이 전달되기 때문이다. 그러므로 사면의 높이 및 분리된 암괴의 폭은 중요한 변수이다. 기상현상과 전도파괴에 대한 상관관계연구는 현재까지 보고사례가 풍부하지 못한 실정이나 기상현상이 1차적으로 직접영향을 미치는 못하는 것으로 파악되고 있다. 하지만 기상현상이 장단기적으로 전도파괴에 영향을 끼치는 것만은 사실이며 단기적으로는 토질의 함수비 변화, 결빙과 해빙작용 등은 전도가 점진적으로 진행될 수 있도록 한다. 기상현상으로 급진적 전도파괴를 유발하는 것은 거의 드물다. 장기적으로는 기상현상으로 인한 풍화로 인해 균열폭이 증가한다든지 깊이가 깊어지는 등의 영향을 생각해볼 수 있다.

해수의 작용이나 하상침식 등으로 하부가 침식되어 상부에 돌출부위가 형성되며 절리나 퇴적층에 작용하는 간극수압도 전도파괴발생의 중요한 요인이다. 표 7.7에 전도의 위험도를 진단할 경우 활용할 수 있는 관찰요소를 정리하였다. 전도파괴는 초기에는 천천히 발달하다가 점진적으로 하부로부터 파괴가 발생하거나 회전 등을 거쳐 갑자기 붕괴되므로 특히 위험하다. 대규모의 붕괴를 유발할 수 있고 암석의 이동속도가 상당히 빠른 특징이 있다.

표 7.7 전도의 진단요소

위험요소	관찰가능한 요소
<ol style="list-style-type: none"> 1. 자유표면 및 경사가 큰 사면 및 절벽 2. 충분한 하중감소 3. 넓이에 비해 상대적으로 높은 높이 4. 암괴기둥이 서있을 정도의 강도 5. 주상으로 발달한 두드러진 수식절리 6. 표면과 평행한 절리나 인장균열 7. 하부재료에 불안정하게 분포된 절리경사 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 사면상부에 발달한 인장균열 및 부분적으로 독립된 주상암괴 및 기타 하중제거 시 나타나는 현상. 하부로 퍼진 균열은 지진과 탐사가능 2. 암석표면에 개방수직절리 관찰가능 및 개발절리공간에 상부재료충진 3. 절벽하부에 교란된 지층이나 배부름현상발생 4. 주상암괴가 파괴된 표면에 풍화흔적 미약 5. 이동재료는 대단히 불균질하게 운동

낙석과 마찬가지로 위험구역도가 필요하며 안전율이 계산된다면 파괴예측이 가능하다. 전문기술자의 판단이 필요한 산사태 유형이다.

다. 회전활동

회전활동(回傳活動, rotational slide)에서 사용되어진 용어 “활동”은 지반재료가 움직임에 있어 인식가능한 전단면을 따라 파괴가 발생하는 것을 의미한다. 이러한 전단면의 형식과 개수는 활동체 집단을 구분할 때 사용되는 경우가 있다. 결국, 여기서 “회전”이라 함은 전단면이 원형 혹은 순가락의 밑면모양으로 형성되어 사면이 파괴되는 경우에 붙여진 구분이다.

활동면은 완벽한 원형이 아닐 수도 있으며 분리된 재료내부에는 큰 교란이 없는 특징이 있다. 즉, 회전운동 후에 지반의 경사가 기울어질 수는 있으나 경사의 변화 이외에는 대체로 일체형으로 움직이게 된다. 회전활동에 의한 사면붕괴의 크기는 수 m²에서 수 ha까지 가능하며 회전활동이 발생하면 지하수위가 변화하여 불규칙하게 재분포하게 된다. 사면붕괴 말단부에서는 높은 간극수압이 발생하며 때때로 피압수대(artesian)가 형성되어 침투수가 발생되기도 한다.

회전활동에 의해 사면파괴가 일단 진행되면 하부로 이동하는 재료는 회전하게 된다. 몇 개의 지괴 및 암괴로 분리되어 회전하기도 하며 횡단균열이 발생한다. 사면 상부쪽

으로는 경사면과 반대쪽으로 지반이 기울어지며 파괴 후에는 오히려 경사면이 반대쪽으로 형성되기도 한다. 울퉁불퉁한 지형이 형성되며 회전활동의 속도는 현장에 따라 몇 백배의 차이가 나기도 한다. 1년에 수 cm이동이 발생하기도 하고 한달 안에 수 m를 이동하기도 한다. 특히 지반재료가 토사일 경우 초속 수 m이동이 가능하다. 토사지반이 포행(creep)하는 것은 회전활동의 전조현상으로 보아도 되며 특히, 식생분포에 의해 과거 활동을 감지할 수 있다. 나무가 일정형식을 가지고 뒤로 기울어져 있을 경우는 거의 확실하게 회전활동이 발생한 현장인 것을 알 수 있다.

회전활동이 발생할 수 있는 지질조건은 표토가 두터운 사면이다. 지반을 강화할 수 있는 식생이 없는 경우, 심하게 풍화되어 균열이 발생한 암반사면, 이암 및 투수율이 다양하고 강도가 각기 다른 풍화암이나 퇴적암, 그리고 수평 퇴적층이 발달한 모암 등에서 발생한다. 회전활동을 유발하는 일반적인 요인은 해파나 하천에 의한 침식, 굴착, 건설공사 등을 들 수 있다. 발생을 직접 유발하는 요소는 지진, 폭발, 상재하중의 급작스런 증가, 호우나 해빙기에 발생하는 지하수위의 상승 등이다. 특히 해빙기 및 호우시 발생하는 수하간극수압의 변화는 가장 큰 영향요소이다. 회전활동이 발생할 경우 활동암괴가 1개가 아니고 다수로 발달할 경우 다중회전활동(multiple rotational slide)이라고 한다. 활동암괴가 각각 분리되어 회전하지만 기저에서 발달하는 전단면은 단 1개이다. 다중회전활동은 복잡한 운동을 보여주기 때문에 과거 산사태 지역을 조사할 필요가 있을 경우 시추를 하여야 하며 붕괴사면 하부는 상승하는 지형을 보여준다. 활동암괴가 발생하는 시기는 각기 다를 수 있으며, 일반적으로 전후의 암괴에서 응력재분포가 발생하여 붕괴가 진행되기 때문에 비교적 느리게 다중회전활동이 발생하며 결과적으로 인명피해 등을 유발하는 큰 위험성은 없다고 할 수 있다.

다중회전활동과 구분되는 또 다른 회전활동은 연속회전활동(successive rotational slide)이다. 다중회전활동과 달리 기저에 발달한 전단파괴면이 원형으로 이어지는 1개의 파괴선으로 진행되지 않으면서 각각의 회전활동이 연속적으로 나타난다. 대부분의 연속회전활동은 깊이가 깊지 않고 측방향의 확장은 클 수 있다. 상부 및 하부 회전활동은 각각 서로 영향을 줄 수 있으며 연쇄반응을 통하여 광범위한 지역에 영향을 줄 수 있다. 이러한 연속회전활동을 유발하는 제 1의 요소는 사면 경사각이다. 경사가 상대적으로 크지 않은 곳(8~30°)에서 발생하는 것으로 보고되고 있다. 두 번째 요소는 지반구성재료이다. 토사지반에서 주로 발생하며 암반지반에서는 거의 발생하지 않는다. 하나의 회전활동이 발생하거나 측방향의 지지력이 상실될 경우 발생하기도 하며 토사지반의 포행과 연계되어 발생하기도 한다.

사면하부로 사면붕괴가 진행(advancing)되거나 옆으로 확장(widening)될 수도 있으나, 회전활동의 발달은 사면상부로 진행되는 것(retrogressive failure)이 일반적이다. 우리나라에서도 자주 발생하는 형태이며 특히 토사지반에서 일반적이다. 침식, 굴착, 집중호우, 배수불량, 지하수 상승 등에 의해 주로 발생한다. 사면 하부가 침식되면 소하천 크기부터 대규모 해안선 붕괴까지 다양한 크기로 발생할 수 있다. 과거에 붕괴된 이력이 있으면 대부분 또 다시 붕괴가 발생하고 대규모 도로개발 등이 주요 요인이 되기도 한다. 붕괴이력에 대한 충분한 검토가 없이 이전 붕괴 지반에 개발을 하기 때문에 우리나라뿐만 아니라('99황령산 터널입구 2차붕괴사고) 외국에서도 많은 문제를 발생시키고 있다. 특히, 과거 산사태 붕괴지반의 상부에 성토를 할 경우 파괴는 거의 확실하며 경험이 많은 기술자들이 교란된 지반의 분석 등을 담당하여야 한다. 표 7.8은 회전활동의 위험도를 진단할 경우 활용할 수 있는 관찰요소들을 정리하였다.

표 7.8 회전활동의 진단 요소

위험요소	관찰 가능한 요소
<ol style="list-style-type: none"> 1. 급한 경사, 하부 굴착지역(undercut areas), 강이나 바다에 의한 침식 2. 지하수위 상승 3. 균등 압밀 점토 (Consolidated and uniform clays) 4. 불투수층위에 있는 투수층 암반 5. 다중 산사대는 전단면을 유발시키는 연약층 필요 6. 퇴행성 하중제거(Retrogressive unloading could generate new slides) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 언덕모양의 지형(Hummochy ground) 2. 경사가 급한 사면하부 (Toe with a steep front) 3. 표면이 뒤로 젖혀진 상부 (Crown with back-tilted surface) 4. 충전물이 들어있는 빈 공간(Hollows with washed debris and organic materials) 5. 지하 전단면을 가진 우연한 그러나 층이 진경사면(Smoothened but recognizable slope surface with shear beneath the ground) 6. 사면상부의 인장균열 (Tension crack at the head)

라. 병진활동

병진활동은 전단면이 원형이 아닌 활동을 말하며 거의 직선에 가까운 지하파괴면을 동반하여 병진운동(강체와 같이, 지반을 구성하는 각 지점이 같은 방향으로 평행하게 이동하는 운동)을 유발한다. 이러한 활동은 사면을 형성하는 지반재료에 존재하는 연약대의 표면에 대부분 좌우된다. 연약대는 부정합면을 말하는데 주로 교차하는 절리면이나 기울어진 퇴적면, 단층, 전단강도가 다른 퇴적층, 혹은 전단면 등이다.

병진활동은 지반구성성분에 따라 블록활동과 슬랩활동으로 양분되어지는데 이들 두 가지 활동은 경사가 상대적으로 작은 사면에서 발생한다. 블록활동은 암반사면에서, 슬랩활동은 토사 및 잡석에서 발생한다. 블록활동과 슬랩활동외에 병진활동 중 상대적으로 경사가 급할 경우, 암반사면일 경우는 암반활동이라하고 잡석과 토사가 섞여 병진활동 할 경우 잡석활동이라고 특별히 명명한다. 암반활동과 잡석활동은 병진활동 발생 시 이동속도가 상대적으로 크며 복잡한 산사태모양을 나타낸다. 또한 지반성분이 작은 크기의 토질재료로 대부분 이루어져 있을 경우 머드슬라이드라고 한다. 병진활동의 일종인 머드슬라이드는 회전활동 혹은 흐름과 간혹 구분이 힘든 경우가 있다.

1) 블록활동

블록활동은 경사가 크지 않은 암반사면이나 암반지반에서 원형이 아닌 전단파괴면을 가지고 병진활동을 하는 것을 말한다. 전단파괴면은 다수 발견 될 수 있으며 심각한 재해는 각기 다른 블록이 다른 상대속도를 가지고 이동할 경우에 발생한다. 이동속도는 상대적으로 느린 것이 일반적이며 블록활동이 발생하는 기본적인 원인은 암석의 형태가 갑자기 변하거나 사면쪽으로 기울어진 퇴적면을 가지는 연약한 층서가 갑자기 나타날 경우에 흔히 발생한다. 또한 침식으로 인해 사면앞쪽의 지지력이 감소할 경우에 자주 발생한다. 높은 간극수압이 세 번째 발생원인으로 작용한다.

이런 종류의 산사태는 대규모이며 기울어지면 위험한 건축물(타워 등)이 특히 큰 피해를 입을 수 있다. 또한 선형의 구조물(도로, 철도, 가스, 전기, 통신 선로 등)은 이러한 산사태에 피해를 입으면 복구가 거의 불가능하다. 지반이 블록형태로 파괴되기 때문에 구역에 따라 피해가 발생하지 않을 수도 있으나 인접도로 등은 파괴되기 쉽다. 장기간 관찰하면 활동지역이 확연히 구분되며 이런 위험지역은 개발을 처음부터 하지 않는 것이 최상의 선택이다. 현재 구조물이 위치한다며, 철거 후 개발을 하지 말아야 한다. 종합적인 사면위험 지도제작과 지하조사 및 정교한 수위 및 활동측정이 필수적이다.

2) 슬랩활동

슬랩활동은 경사가 상대적으로 작은 토사 혹은 잡석사면에서 발생한다. 다른 이름으로는 토사블록활동 혹은 잡석블록활동이라고도 한다. 슬랩활동은 얇은 깊이로 발생하기 때문에 하중이나 지하수위의 계절적 변화에 상당히 민감하다. 우기 시에는 파괴속도가 빠르며 건기에는 활동이 멈출 수도 있다. 결빙 및 해빙이 직접적으로 슬랩활동을 유발하기도 한다. 슬랩활동도 투수층과 불투수 토질층 사이에서 발생하며 보통 지표면과 평행하게 붕괴가 발생한다. 이러한 이유 때문에 자주 슬랩활동은 무한사면파괴라고도 표시된다. 슬랩활동을 유발하는 요인은 기타 다른 사면붕괴의 요인과 유사하다. 즉, 사면의 지형적 변화, 지하수위 변화 및 인위적요인 등이다. 하지만 크기는 지표토질의 두께와 사면 경사각에 주로 영향을 받으며 부정합면의 영향도 크다.

슬랩활동은 지표면을 크게 교란시키며 블록활동에서와는 달리 이동재료 내에서도 교란이 발생할 수 있다. 도로 등 교통시설에 큰 피해를 유발하며 지형을 구분하여 사면재해지도를 정확히 작성하여야 미래에 발생할 지도 모를 사면재해에 대비할 수 있다. 해석모델은 무한사면해석법을 이용하여야 한다. 소규모 슬랩활동은 큰 재해를 유발하기 보다는 흔히 처리할 수 있는 성가신 존재로 대두될 수 있으나 수 km까지 확장될 경우

막대한 재산피해를 유발할 수 있다. 주거지나 주요사회기반시설이 정확한 지질조사 없이 슬랩활동이 가능한 지역에 위치할 경우 그 피해는 더욱 커진다. 특히 지표면의 슬랩 활동은 시간이 지남에 따라 사라지지만 기저에 존재하는 전단활동면은 계속 존재하므로 각종 개발계획 수립 시 유의하여야 한다.

3) 암반활동

산악지 암반의 경사가 사면경사와 유사한 급경사 암반사면에서 병진활동의 한 형태로 발생한다. 운동형태는 다양하며 운동속도는 대체로 느리다. 급격하게 사면하무로 내려올 경우 암석산사태로 변화되며 우기 시에는 토석류로 진행되기도 한다. 일반적으로 병진활동의 속도와 이동거리는 회전활동보다는 큰 것으로 알려져 있다.

암반활동의 발생조건은 경사가 급한 암반사면이 있어야 하며 절리가 다수 발달한 사면에 풍화가 진행된 경우이다. 연결되지 않은 간극수압도 직접적인 요인으로 작용할 수 있으며 앞부리 부분에 진행된 침식과 주위의 충격 등 내부마찰을 감소시키는 외부요인들이 작용하여 암반활동을 유발한다. 기본적인 요인은 내부적인 마찰요인보다 그 영향이 큰 외부의 다양한 요소들이다.

암반활동과 동반되는 속도 및 활동 후 퍼지는 정도는 다양하여 인적, 물적 피해를 야기할 수 있다. 급경사지역에서 암반사면이 급격히 붕괴되어 내려올 때의 파괴력은 상당히 크며 암반활동의 재료가 지나온 자리는 완전히 파괴된다. 상대적으로 저속으로 파괴되는 경우라도 전단면의 주위는 큰 타격을 입게되며 특히 평상시 발견이 쉽지 않으므로 암반활동이 발생할 경우 인명피해의 발생은 거의 피할 수 없게 된다. 앞에서 언급되었듯이 위험지 파악을 전문가를 통해 평상시 실시해야만 피해를 저감할 수 있다.

4) 잡석활동

경사가 상대적으로 큰 사면에서 잡석과 토사가 섞여 병진활동할 경우 잡석활동이라고 특별히 명명하는데 길이에 대한 깊이의 비가 0.05이하인 경우가 대부분이다. 보통 붕적토나 풍화가 심하게 진행된 암반사면에서 발생한다. 발생 가능한 경사도는 18~50° 정도에서 주로 발생한다.

잡석활동의 속도는 경사도에 비례하며 점토함량에 반비례한다. 초속 16m까지 보고된 사례가 있으며 대부분의 잡석병진활동은 수분이 충분히 공급될 경우, 특히 지형적으로 계곡이 형성될 경우, 토석류로 진행된다. 잡석활동은 주로 집중호우와 지진에 의해 발생된다. 발생가능성은 벌목이나 산불로 인해 식생이 파괴되었을 때 더욱 커지게 된다.

호우로 인한 간극수압의 증가와 그에 따르는 전단강도 저하가 잡석활동의 기본원인이다. 식생이 자라있는 경우 이러한 잡석활동지역을 찾기란 쉽지 않으며 대규모 항공측량을 통해서 찾아야 한다. 이러한 지역을 관리하기 위해서는 토심을 나타내는 토양도 및 경사분석도 등을 분석하여 피해발생가능 지역을 선별하여야 하며, 이때 토질을 따로 분류해보아야 한다.

5) 머드슬라이드

지반성분이 작은 크기의 토질재료로 사면의 대부분이 이루어져 있을 경우 머드슬라이드(mudslide)가 발생하는데 비교적 느린 속도로 일정 범위 안에서 병진활동으로 이동하여 사면하부로 내려온다. 미국에서는 earthflow라고 부르기도 한다. 경사가 크지 않아도 발생하며 사면표면에 다양한 균열이 발생한다. 주로 포화된 점토지반에서 발생하는데 중간강도의 소성을 가진 과압밀 점토나 실트스톤 등에서도 발생한다. 상부에서 이동하는 재료는 하부 기반암으로부터 분리되어 이동되며 속도는 연간 1m에서 25m 정도로 느린 편에 속한다. 하지만 하루에 수백 m의 거리를 이동한 보고도 있으며 아주 장기간 동안 전혀 움직임이 없는 경우도 있다. 계절적 영향을 받으며 우기 시에는 활동이 증가한다.

머드슬라이드의 발생조건은 우선 미세 토질 등 지반재료가 적합해야한다. 또한 수분의 공급원이 있어야 하며 경사 또한 일정부분(9°)을 확보되어야 한다. 비배수조건인 하층은 낮은 경사도에서도 머드슬라이드를 발생시키는 중요한 요소이다. 다른 사면붕괴 발생요인과 마찬가지로 사면하부의 침식작용도 중요하다. 머드슬라이드가 발생하면 인공구조물은 대부분 파괴된다. 통신선과 심지어는 하천이 흐르는 방향에도 영향을 줄 수 있으며 급격한 파괴는 인명피해를 유발하기도 한다. 과거 머드슬라이드 발생지역은 식생을 관찰하면 식생의 수령에 따라 어느 정도 파악할 수 있으며, 공학적 대책을 마련할 때는 수분의 공급을 차단할 수 있도록 적정 배수시설을 반드시 설치하여야 한다. 수분 유입을 막아 간극수압이 상승되지 않도록 해야 하며, 이러한 대책은 이런 지역에 구조물 기초를 마련할 때도 필요한 조치이다. 도로를 포함한 선형구조물은 특히 유의하여 설치하여야 한다.

마. 퍼짐

퍼짐(lateral spreading)은 기저 전단면이 명확히 구분되어 있지 않은 하부의 움직임은 연약층 위에서 암반이나 토사 등이 이동하는 것을 말한다. 퍼짐현상과 동반된 정확

한 메커니즘은 아직 잘 알려져 있지 않으며 그 이동속도나 크기도 다양하게 보고되고 있다. 최초로 피짐에 대해 보고한 학자는 Jahn(1964)이다. 주로 중력작용에 의해 이동하며 이동속도는 연간 $10^{-4} \sim 10^{-1}m$ 정도이다. 대규모 피짐의 경우 계절적 영향은 없으며 균질암반에서의 피짐현상을 유발하는 정확한 원인은 아직 밝혀지지 않았으나 연성의 하부 기반암 위에 있는 견고한 암석이동원인에 대하여는 잘 밝혀져 있다. 지진에 민감하게 반응하며 특정지역의 지질 및 지형적인 조건에 크게 영향을 받는다.

피짐에 의한 사면불안정은 장기간 관찰해야 하는 경우가 많으나 이러한 지역에 건설을 할 경우 지속적인 지반변형으로 시설물에 큰 피해를 유발할 수 있다. 지질 및 지형 조사를 통하여 위험도를 파악하여야 하며 굴착을 통해 위험도 평가를 위한 자료를 수집하기 위해서는 상당한 깊이까지 천공을 해보아야 한다. 의심이 가는 지역에 대하여 GPS같은 장비를 이용하여 장기간 관측하는 것도 하나의 방법이다. 현장 mapping이나 항공사진해석은 경험이 많은 기술자에게 의뢰하여야 하며 상대변위가 발생하는 지역은 가장 재해에 취약한 곳이다. 이동이 발생하는 암괴 위에 시설물을 구축하는 것은 상대적으로 안전할 것이나 사면하부에 건설하는 것은 바람직하지 못하다.

암괴가 토양으로 이루어진 경우도 피짐현상의 발생이 가능하며 토사로 이루어진 지괴가 이동할 경우 액상화가 동반되기도 하며 지반구성성분에 따라 quick clay가 관계되기도 한다. 특히, 이런 종류의 산사태가 발생할 수 있는 지역은 경사가 작고 농업이나 도시개발에 적합한 곳이 많다. 안정성에 대한 통제가 어렵기 때문에 주요 구조물의 입지로서는 바람직하지 않으며 기존 시설물이 있는 경우 통제가 필요하다. 위험지도를 제작할 때에는 광범위한 지반조사가 선행되어야 하며 특히 위험한 지역은 보통 강가나 해안에 위치하고 있으므로 하부침식에 유의해야 한다. 하안(河岸) 침식에 대한 이해는 안정성 확보나 복구공사에 꼭 필요한 요소이다.

바. 흐름

흐름은 사면구성요소가 각각 분리되어 이동하는 산사태를 말하며 주위에 있는 재료에 관계없이(풍화가 심하게 진행된 암반, 토사 및 쇄설암 등) 흐름의 형태로 내려올 수 있다. 지속적이고 회복이 불가능한 변형을 유발하며 이동재료내부에서 상대변형이 일어나는 것이 흐름의 중요한 특징이다. 이동되는 재료에 따라 암반흐름(rock flow), 토석류(debris flow), 토사흐름(soil flow), 머드플로우(mud flow) 등으로 세분되기도 한다. 모두 토석류와 유사한 행태를 가지며 토사흐름의 경우 수분을 동반하지 않고 발생할 수도 있다. 혼한 경우는 아니지만 대규모 재해를 유발할 수 있다.

암반흐름의 경우 아래와 같은 몇 가지 요소들에 의해 특징지어진다.

- 관계되는 암반의 부피는 수천 m^3 이며 두께는 수십 m이다.
- 지속적인 기저 전단파괴면이 반드시 발달하지 않아도 된다.
- 전체 이동거리는 관계되는 암반의 규모에 비해 그다지 크지 않다.
- 크기요소가 관계되는 암반의 기계적 특성 및 변형특성에 영향을 준다.

이동모델에 대한 정확한 이해는 아직 발견되지 못하고 있으나 구속압과 소성변형의 관계에 대한 연구가 진행된 경우는 보고되고 있다(Savage and Varnes, 1987). 암반흐름은 중력을 크게 받을 수 있는 급경사 지역에서 발생하는데 이러한 현장은 전체적으로 외형적인 단기적 안정성은 유지하고 있어야 한다. 해안 절벽이나 산악지역에서 흔히 발견될 수 있으며 광역지질작용에 영향을 받는다(Gentili and Pambianchi, 1994). 암반흐름이 직접적인 재해요인으로 나타나지 않으나 산악지역에 건설된 댐과 같은 중요시설물은 주위에서 발생할 지도 모를 흐름현상에 주의하여 건설하여야 한다. 시설물이 위치할 현장을 포함하여 주변에 대한 조사가 절대적으로 필요하다. 항공사진 분석이 흐름으로 발생할 지도 모를 재해에 대비하는 가장 현실성 있는 대안이다.

토석류는 모래나 점토같은 세립자 토질과 자갈과 같은 상대적으로 큰 토질이 물과 섞여 반죽과 같은 형태로 아래로 흘러내리는 사면붕괴를 말한다. 토석류의 이동거리는 상대적으로 크며 일반적으로 압밀이 완전히 진행되지 않은 암석 및 토사가 사면표면에 얇게 분포할 때 발생한다. 재료공급원, 이동통로, 그리고 퇴적지라는 3개의 요소가 토석류를 분석할 때 구분된다. 흐름은 기존 배수방향을 따라 발생하며 V자 모양이나 사각형의 이동통로를 가진다. 토석류는 수분함량이 비정상적으로 지반내부에 존재할 때 발생한다. 과잉 수분공급은 호우나 해빙, 그리고 드물게는 호수 등이 넘칠 경우에 발생한다. 특히 강우강도 및 이전까지의 누적강우강도는 토석류 발생에 큰 영향을 미친다. Caine(1980)은 73개의 현장을 분석한 후 강우강도(I)와 강우지속시간(D)을 이용하여 역치관계식을 아래와 같이 제안하였다.

$$I = 14.82 D^{-0.39} \quad (7.1)$$

여기서 강우지속시간의 단위는 시간(hour)이며 강우강도의 단위는 시간당 mm이다. 강우강도가 주어질 경우, 상식식보다 강우지속시간이 클 때 산사태가 발생한다는 뜻이

다. 10분에서 10일정도의 강우지속시간 범위에서 적절히 적용되는 것으로 판단된다. 대부분의 토석류는 초기에는 병진활동이나 회전활동으로 시작된다. 비교적 큰 경사도(15~20°)를 가진 사면에서 발생하며 표 7.9는 토석류 유발요인을 선행요인과 촉발요인으로 나누어 각 외부환경별로 구분하여 보여주고 있다.

표 7.9 토석류 유발요인

외부환경	요소	선행요인(P) 및 촉발요인(T)
지질 및 지형	지형, 구성성분, 구조	사면노출(P), 급경사(P), 느슨한 재료의 공급(P), 기존 물길(P), 붕괴(P)
환경	기상 및 수문, 식생, 외부재해요인	집중호우(P, T), 해빙(P, T), 지층불안정(P, T), 식생부재(P), 지진(T), 화산폭발(T), 홍수(P, T)
토지이용	인위적 활동	진동(P, T), 저수지 수위변동(P, T)

토석류는 우리나라에서 인명피해를 유발하며 가장 많이 발생하는 산사태 형태로서 도시지역에서 대규모 흐름이 발생할 경우 사회경제적, 인적, 물적 피해가 심각하다. 작은 규모라도 산악지대에서는 교통망을 유실시키는 피해를 유발하며 토석류는 강이나 소하천을 막아 2차 재해를 유발하기도 한다. 토석류의 유입장소를 파악하여 대책을 세워야하며 퍼져나가는 지역 또한 사전에 평가하여 미리 대비하여야 한다. 실시간 관측시스템과 위험지도 작성이 필수적이다.

사. 복합산사태

일반적으로 보통의 사면붕괴는 초기에 발달형태가 변화하여 하부로 이동하면서 다른 형태로 변하는 복합산사태(複合山沙汰, complex)로 발전한다. 대표적인 복합산사태는 암반산사태(rock avalanche)와 흐름 활동(flow slide)이다. 암반산사태는 그 파괴력이 대단하며 상당한 속도로 이동한다. 암반산사태가 우려되는 지역의 유일한 해결책은 구역화를 통한 개발통제이다. 일단 암반산사태가 발생하면 계곡 등이 폐쇄되었는지를 조사해보아야 하며 2차 재해를 미연에 방지하기 위해서는 이러한 지역을 제어해야한다. 흐름활동의 경우 이런 형태의 산사태는 한번 발달하면 복구한다는 개념보다는 예방하고 지역을 회피하는 것이 가장 경제적이다. 보통은 현재의 방재공학으로는 이런 산사태는 막을 수는 없으며 지반내부의 공기나 수분이 방출되면서 안정화될 때까지 산사태가

발생하도록 자연적으로 내버려두는 수밖에 없다. 산사태로 이동한 불질은 단위부피가 작아 쉽게 파낼 수 있으며 또한, 한번 발생하면 별도의 조치를 취하지 않더라도 재발하지 않는다. 저감대책은 연약한 퇴적물들이 다량으로 쌓여있지 않도록 평소부터 위험지역에 존재하는 토양을 제거하여야 한다.

3. 우리나라 사면활동 특성

가. 사면의 유형 및 활동시기

사면의 유형은 일반적으로 자연사면과 인공사면으로 나누며, 인공사면은 다시 절토사면과 성토사면으로 나눈다. 조사 대상지역은 도로개설과 주택 및 산업단지 조성에 의하여 형성된 사면이 주를 이루고 있다. 표 7.10은 전체 조사지역에 대한 사면의 유형을 나타낸다.

표 7.10 조사 대상지역의 사면유형

구분	사면의 유형			
	절토사면	성토사면	자연사면	계(96)
활동지역	21	5	1	27(77)
미활동지역	4	1	3	8(23)
계(96)	25(71)	6(17)	4(12)	35(100)

사면분석 지역은 대상지역의 77%가 사면활동이 발생하였고, 23%는 사면활동이 우려되어 안전진단을 받은 것으로서, 이 중에서 절토사면의 활동으로 인하여 안전진단을 받은 경우가 60%로서 가장 많았다. 표 7.11와 같이 공사 진행상태에 따른 사면의 활동시기를 볼 때 사면활동은 전체의 66%가 사면의 절토 또는 성토공사 완료 후 발생하였다. 자연사면의 활동 및 미활동 구간은 대체로 옛날에 여러 번의 사면활동이 발생하였거나 발생 가능성이 있는 지역 또는 그 인근 지역으로서 활동에 대한 재해위험지구로 선정된 경우가 많았다.

표 7.11 사면 활동 지역의 활동시기

구분	활동시기			
	공사전(자연사면)	공사중	공사후	계
활동지역(개소)	1	4	8	27
비율(%)	4	30	66	100

나. 사면활동의 원인

우리나라에서 발생한 자연재해 중 풍수로 인한 피해가 대부분을 차지하고 있다. 사면활동이 발생한 27개 지역에서 활동의 직접적인 원인을 조사한 결과 강우에 의하여 사면활동이 발생한 지역은 미확인 구간을 제외한 20개소 중 17개소이며, 이는 전체의 85%로서 강우 시 사면활동이 주로 발생하고 있다는 것을 보여준다. 강우에 의한 사면의 활동이 많아지는 것은 우리나라에서 가장 많이 발생하는 재해인 산사태와 밀접한 관계가 있다.

다. 사면활동의 형태

1) 토질별 사면활동

사면의 활동형태는 토사와 암반구간에서 차이가 있다. 토사구간에서는 주로 원형활동, 썩기활동, 평면활동이 주로 발생하고 있으며, 암반구간에서는 썩기활동, 평면활동, 원형활동, 전도활동 등이 발생하고 있다. 표 7.12는 암반사면의 활동한 구간에 대한 사면의 활동형태를 나타낸다.

기존 사면이 활동한 지역에 대한 조사 결과 토사구간에서는 원형활동이 주로 발생하고 있으며, 암반구간에서는 썩기 및 평면활동이 약 70%로서 주종을 이루고 있으며, 전도활동이 약간 일어나고 있는 상태이다. 그러므로 토사구간에서의 사면활동에 대한 조사는 원형활동을 우선으로 고려하고 또한 암반구간에서의 활동에 대한 현장조사에서는 썩기 및 평면활동의 가능성에 대하여 고려해야 한다.

특히 암반구간에서는 낙석의 발생 비율이 높아 상부 토사층의 활동으로 인한 암반사면의 노출과 노출된 사면의 풍화 등으로 인하여 낙석의 위험성이 증가되고 있다.

표 7.12 암반사면의 활동형태

구분	원형활동	썩기활동	평면활동	전도활동	계
구간수	2	7	7	4	20
비율(%)	10	35	35	20	100

2) 암종류별 활동형태

사면의 활동은 토사와 암구간에서 활동형태가 다르게 나타나듯이 기반암의 종류별로 또한 다른 활동양상을 나타낸다. 표 7.13은 토사 및 암반구간에서 기반암의 종류별로 활동형태를 나타낸다.

화성암구간은 주로 안산암 및 화강암이 분포하며 풍화잔류토가 원형활동을 일으킨 지역으로 암반자체의 활동가능성은 극히 미약한 것으로 나타나므로 화성암구간에서는 암반자체에 대한 조사보다는 화성암의 붕적잔류토, 풍화화강토 등의 실트질화 또는 모래질화된 토사부분과 풍화된 암반에 대한 고려가 우선되어야 한다. 퇴적암구간에서는 평면활동, 변성암구간에서는 썩기활동에 대한 검토가 우선 고려되어야 한다.

표 7.13 기반암의 종류별 활동형태

구분	원형활동	썩기활동	평면활동	전도활동	계(%)
퇴적암	1	1	4	2	8(40)
변성암	1	6	3	2	12(60)
계(%)	2(10)	7(35)	7(25)	4(20)	20(100)

4. 대책공법 선정 시 고려사항 및 적용기준

가. 산사태 예방공법 선정 시 고려사항

산사태의 발생원인을 규명하는 것은 산사태의 발생기구를 파악하여 사전에 산사태 발생 위험성을 예측하고 그 대책을 강구하는데 대단히 중요한 사항이다. 산사태는 지각 운동으로 인하여 파쇄대가 많은 지역과 같은 지형 지질의 악조건하에 호우나 폭설의 영향이 겹쳐서 발생하게 된다. 이와 같이 산사태는 자연사면자체에 취약성이 있는 지역에 사면외부의 영향이 겹쳐 발생하게 된다.

그러므로 이들 요인을 분석하기 위해서는 다음과 같이 내, 외적 요인 및 시공상 파괴

요인으로 구분될 수 있다.

- ㉠ 내적요인 : 지질, 토질, 지질구조상 소인 및 지형상 소인
- ㉡ 외적요인 : 자연적 유인 및 인위적 유인
- ㉢ 시공방법의 영향 : 절개 및 토공 시 발파진동, 계획보다 과대설계, 터파기시 안식각 부족 및 진동과괴
- ㉣ 방치기간의 영향 : 사면시공 후 안정공법 시공 전 지표수 유입, 절취면의 지표수 유입에 의한 부분유실
- ㉤ 토질정수의 영향 : 설계 시 적용된 토질정수의 상이함, 내재된 지반의 불연속성의 출현 등

한편, 산사태 예방공법의 선정을 위해 필요한 선정기준의 마련을 위하여 고려하여야 할 사항은 현장조건(㉠~㉢) 및 기타관련사항(㉣~㉤)으로 구분될 수 있다.

- ㉠ 사면지반의 풍화정도
- ㉡ 절리상태의 양호
- ㉢ 사면활동의 강우관련성
- ㉣ 사면표층부의 침식정도
- ㉤ 용출수의 유무
- ㉥ 세굴현상의 존재유무
- ㉦ 낙석의 위험유무
- ㉧ 공사 시 공공시설 및 교통영향
- ㉨ 대책공법선정 시 단일 및 혼합공법 채택의 경우 경제성
- ㉩ 대책공법선정 시 단일 및 혼합공법 채택의 경우 시공성
- ㉪ 미적영향
- ㉫ 환경친화적 여부

나. 산사태 예방공법의 적용기준

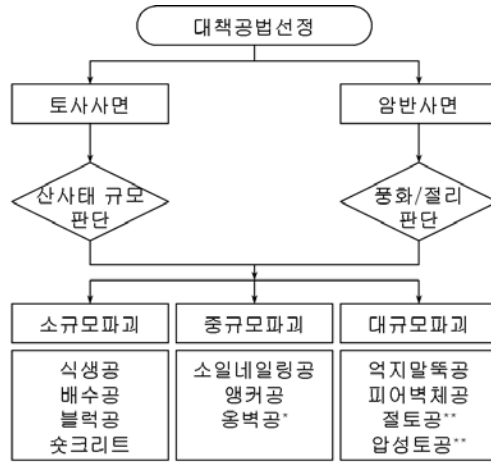
1) 파괴규모

산사태 예방공법의 선정 및 적용은 어떤 종류의 사면을 막론하고 대상사면의 규모, 사면기울기와 높이, 지형조건, 지질조건 및 주변여건 등에 대한 충분한 사전조사결과를

토대로 이루어져야 한다. 복구공사를 위한 보강공법선정의 경우에는 이외에 별도로 붕괴의 원인을 고려하여 대책공법을 선정해야 할 것이다. 자연사면의 붕괴방지대책 및 이전 파괴면에 대한 복구공법의 선정에 있어서는 많은 정보를 이용하여 대책공법을 수립하는 것이 바람직하다. 여기에 필요한 자료들로는 지형도, 지질도, 현장조사에 의한 사면정보, 계측에 의한 사면활동의 정보 등 여러 가지가 있는데 복구공법에 있어서는 붕괴당시의 상황에 대해서도 고려할 필요가 있다. 절개사면의 경우는 자연사면에 비하여 현장조건의 파악이 비교적 용이하기 때문에 적용가능 공법별 특성을 파악한 후 허락되는 경제적 조건하에서 최적의 공법을 선정하면 된다. 절개사면은 보통 자연사면에 비하여 교통시설이나 주택시설 등 인간의 생활과 밀착되는 경우가 많으므로 다소의 경제적 부담을 감수하더라도 가장 확실한 공법을 선정할 필요가 있다.

건설부(1988) 및 송영석(2004)은 산사태의 발생규모를 면적 혹은 체적개념으로 구분하여 제시한 바 있다. 건설부(1988)의 경우 소규모 산사태는 0.1ha미만이고, 중규모 산사태는 0.1~1.0ha이며, 대규모 산사태는 1.0ha이상이라고 제시한 바 있다. 그리고, 송영석(2004)은 소규모 산사태는 $900m^3$ 이상이라고 제시한 바 있다.

이와 같이 면적 및 체적별로 구분된 산사태의 규모에 따라 예방공법이 선정 및 적용되어야 할 것이다. 산사태 예방공법을 선정 및 적용할 경우, 암반사면과 토사사면으로 나누어 그림 7.12와 같이 나타낼 수 있다(송영석, 2004). 암반사면의 경우는 실제 사면 지반의 풍화와 절리상태에 따라 사면보강공법이 결정된다. 그리고 산사태 규모에 따라 소규모파괴, 중규모파괴 그리고 대규모파괴로 나누고 각각의 산사태 규모에 따라 사면보강공법을 결정할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 소규모파괴의 경우는 식생공법, 지표수 배수공법, 블록공법, 표층안정공법, 낙성방지 Net, Shotcrete 등으로 보강할 수 있으며, 중규모파괴의 경우는 Soil nailing, Rock bolt 공법, 옹벽공법 등으로 보강할 수 있다. 그리고 대규모파괴의 경우는 앵커공법, 억지말뚝공법, 질토공법, 압성토공법, 피어벽체공법, 지하수 배수공법 등으로 보강할 수 있다.



* 옹벽공은 대규모파괴에도 적용가능

** 절토공 및 압성토공은 소규모, 중규모 및 대규모 파괴에도 적용 가능

그림 7.12 파괴규모에 따른 산사태 예방공법(송영석, 2004)

2) 지질조건

표 7.14는 지질조건에 따른 사면의 제반 특성 및 사면붕괴유형을 정리한 것이다(한국도로공사, 1996). 화성암으로 이루어진 사면의 경우 암석강도는 비교적 강하지만 미세균열이 심하게 발달하여 동결융해작용에 의해 쉽게 풍화되는 특성이 있다. 그리고, 풍화심도가 비교적 얇으며 수직절리가 많이 발달하여 경우에 따라 핵석형의 연암질 또는 경암으로 이루어진 암편을 함유하고 있는 것으로 조사되었다. 또한 불연속면의 발달특성은 판상절리 및 수직절리가 우세하여 판상절리에 대한 평면파괴 및 수직절리에 의한 전도파괴가능성이 크며 상부토층의 경우 석영질이 많이 혼입된 자갈 내지 모래질을 함유하여 강우에 의한 토층유실의 발생가능성이 크다. 따라서, 이에 대한 산사태 예방공법으로는 식생공을 적용하여 강우에 의한 토층유실을 방지하는 것이 좋으며, 암반의 낙성을 방지하기 위하여 낙성방지망을 씌우는 것도 좋을 것이다. 한편, 산사태 예방공법 적용시 주의하여야 할 사항은 사면내의 비교적 경암질이 존재한다고 하더라도 락앵커와 같은 공법을 적용할 경우 미세균열 및 핵석형 풍화양상으로 인하여 정착장의 충분한 전단강도 발휘에 문제가 될 수 있다.

퇴적암중 셰일로 이루어진 사면의 경우 풍화특성은 지표에 노출 시 빠른 시간에 풍화를 받을 수 있다는 것이다. 그리고 층리방향과 층리방향에 수직인 경우 암석강도에 큰 차이를 보이는 이방성의 특성을 보인다. 지질구조선은 20°내외의 경사를 갖는 층리

가 우세하며, 층리면에 점토질이 충전되어 있는 경우가 빈번하므로 대규모 평면파괴가 발생할 가능성이 크다. 따라서 이에 대한 산사태 예방공법으로는 압서 언급된 암반특성을 충분히 파악하여 선정되어야 할 것이다. 평면파괴에 대한 대책공법으로는 락앵커 및 억지말뚝을 적용하는 것이 효과적이다. 그리고 절토공을 적용할 경우 사면특성을 파악하여 강도정수를 파악한 후 적절한 안정경사각을 추적해야 한다.

변성암으로 이루어진 사면은 대부분 선캠브리아기의 고기에 형성된 암석으로 복잡한 지질구조가 발달하여 조사 시 주의를 요한다. 주로 조사사여야 할 사항으로는 사면내에 다층과쇄대, 단층점토 등의 약선대의 존재여부를 주의 깊게 판단하여야 한다. 암반내에 열수용액의 작용으로 인한 하부에 풍화대의 존재 및 핵석형의 풍화양상을 보이기도 하며, 풍화대의 심도가 깊다. 경암으로 이루어진 암석이라 할지라도 그 하부에 사면방향과 유사하게 발달된 단층과쇄대와 같은 약선대가 존재한다면 대규모의 산사태가 일어날 수 있다. 따라서 이에 대한 산사태 예방공법으로는 시공성 및 현장여건을 고려하여 여러 가지 공법을 적용할 수 있으나 암반의 특성을 충분히 파악하여 적절한 공법을 적용해야 할 것이다.

표. 7.14 암종에 따른 사면의 특성 및 붕괴유형(한국도로공사, 1996)

암종	풍화특성	불연속면 발달특성	사면붕괴유형
화성암	강한 강도특성 미세균열 심함 동결융해작용에 의해 쉽게 풍화 풍화심도 비교적 얇음	수직절리발달 절리면 비교적 치밀 절리면 거칠기(rough) 높은 전단강도	낙석 평면파괴 토층유실 원형파괴 전도파괴
퇴적암	지표노출 시 쉽게 풍화 하부에 혼펠스화 작용을 받은 경 암층과 풍화를 받은 연암층과의 경계면의 뚜렷 암석강도의 아방적 특성을 모임	층이발달 층리면의 경사 : 18°~20° 층리면에 점토층 발달 낮은 전단강도	평면파괴 낙석 (세일의 차별 풍화에 의함)
변성암	단층과쇄대, 단층점토 등의 약선 대가 존재가능 큼 암반내에 열수용액의 작용으로 인 한 하부 풍화대 존재 가능성 큼 핵석형 풍화양상 풍화심도 깊음	단층에 의해 붕괴가능성 큼 복잡한 지질구조	평면파괴 썩기파괴 원형파괴

5. 적용성 평가

사면활동에 대한 제안된 대책공법의 지질 및 지형 특성별 적용성은 아래와 같다.

- ① Earth Anchor공법은 두꺼운 붕적층 또는 파쇄가 심한 풍화잔류토와 풍화암 지역에서 원형활동이 우려되는 지역, 지층간 경계가 뚜렷하고 작은 활동현상이 일어난 지역 및 개방구간에 단층점토와 경면, 인장균열 등으로 썩기 활동이 우려되는 지역에 적용되고 있다.
- ② Earth Anchor 옹벽(앵커벽)공법은 점토 충전절리, 전단파쇄대, 인장균열에 의한 얇은 활동 및 썩기활동이 발생하는 지역, 절리면경사가 사면경사와 비슷하고 엽리로 인한 평면활동이 우려되는 지역, 활동암이 하단부에 지지되어 있고 충전절리, 차별풍화 및 박리작용으로 핵석이 존재하는 지역, 수류에 의한 사면하단부의 침식 방지 및 붕적층의 활동과 연약층 위에 성토된 사면의 활동을 억제하기 위해 적용

되었다.

- ③ Soil Nailing 공법은 토사사면이 암반의 활동 및 단층파쇄대 등으로 썩기 활동이 우려되는 구간, 편마암지대의 잔류토와 풍화가 심한 암반으로 구성된 대절토 풍화 암지역 및 인장균열, 층리 또는 절리면이 사면경사와 비슷하여 평면활동이 우려되고 용출수가 있어 얇은 활동에 대한 대책이 필요한 지역에 적용성이 좋다.
- ④ 억지말뚝공법은 지반활동을 직접 억제하는 억제기능과 이동층과 부동층 사이에 썩기를 막아 지반활동을 억지하는 썩기 기능을 가지는 것으로서, 기초부 암반이 토압으로 활동현상이 발생한 지역, 토층 사이의 경계면에서 평면활동이 발생하거나 풍화층의 유실과 침식으로 표면붕괴의 우려가 있는 지역 또는 급구배 토사사면의 구배완화가 불가하거나 단층파쇄대 구간으로서 지하수위가 낮고 침투수 영향이 적은 구간에 적용된다.
- ⑤ 뿌리말뚝공법은 사면 상부에 주요 구조물이 존재하는 성토구간이 붕괴하거나, 사면이 활동한 지역으로 인장균열, 층리 및 절리면이 사면과 비슷하거나 용출수가 있는 사면 등 깊은 활동이 우려되는 구간에 적합하다.
- ⑥ H-pilerlch 옹벽공법은 활동암괴가 하부선단부에 지지된 상태로 전단파쇄대, 박리 작용, 점토충진물로 하부에서의 활동이 우려되어 사면하단부의 저항력 증대가 필요한 지역, 절취노출면의 풍화가 심한 지역 및 두꺼운 붕적토층으로서 오래 전부터 상부 사면의 산사태가 여러 차례 발생하였고 이 활동은 붕적토층과 잔류토층 사이의 경계면이 활동면이 되어 평면활동이 발생하였으며 강우 시 활동 가능성이 있는 지역이 적용되었다.
- ⑦ Rock Bolt 공법은 다양한 절리, 단층대점토 및 전단파쇄대의 블록이 조합되어 썩기활동이 예상되는 지역, 암반이 뜬 상태로 있어 이를 기반암에 고정시키거나, 대규모 단층 및 파쇄대가 존재하고 사면상부는 주향이 사면경사와 비슷하여 평면활동이 우려되는 지역에 적절하다.
- ⑧ Rock Anchor공법은 썩기활동이 발생한 급구배 사면에서 암괴가 뜬 상태로 존재하여 이를 모암에 고정시키기 위하여 적용되었다.
- ⑨ Dowel Barrhd법은 암반에서의 국부적이 절리개방 및 단독 분리암괴로 암편의 탈락이 예상되어 암편을 모암에 고정시키기 위하여 적용되었다.
- ⑩ 활동방지턱(콘크리트블럭+Dowel Bar)공법은 크고 작인 부석이 암괴에 걸려 있거나 활동층면상에 존재할 때 이를 고정하기 위해 적용된다.
- ⑪ Shotcreter 공법은 과발파로 2차 균열이 발생한 지역, 부석, 낙석 또는 뜬 돌이 다

량 발생한 지역, 전단파쇄대 지역의 풍화구간 등의 여굴 또는 표면처리에 적용되며, Rock Anchor 또는 Rock Bolt와 함께 사용되는 경우가 많다.

- ⑫ 기타 기타 암반사면의 보호공법은 전단파쇄대나 수직단층 등의 절리의 발달로 표면박리, 탈락 및 소규모 썩기활동과 원호활동, 낙반이 우려되는 지역, 경사가 급한 단층지대 또는 암편이 결려 있는 암반사면 등에서 Rock Bolt 시공 및 식생이 곤란한 구간에 적용되었다.

6. 결론

기존 산사태 예방공법의 선정을 위한 산사태 분류별 특징 및 우리나라 사면활동의 특성의 연구, 산사태 대책공법 선정 시 주의사항 연구 및 대책공법의 적용성의 분석결과는 다음과 같다.

- ① 산사태의 종류별로 발생 원인 및 발생 지역의 차이가 있기 때문에 그 감지 방법 또한 다양하다. 따라서 지역적 특성을 반영하여 발생 가능성이 있는 산사태를 분류하고 그에 대한 감지 및 방지 대책이 필요하다.
- ② 국사 사면활동의 대부분이 절토구간에서 사면활동이 발생하였으며, 경우에 따른 사면활동이 전체 활동의 85%를 차지하고 있다. 토사구간에서는 원형활동, 암반사면에서는 썩기 및 평면활동이 주로 발생하고 있어 사면에 대한 활동 가능성은 이들에 대하여 고려하고, 암반사면은 활동 후 낙석의 가능성이 높다. 화성암구간은 암반자체의 활동 가능성은 미약하나 풍화잔류토의 원형활동이 우려되어 풍화에 대한 고려가 필요하고 변성암구간에서는 수평 및 수직절리, 단층파쇄대 등 불연속면에 의한 썩기활동, 평면활동이 주를 이루고 있으며 특히 썩기활동에 대한 검토가 우선적 검토가 필요하다.
- ③ 산사태 예방공법의 선정 시 산사태 발생 원인, 산사태 예상 종류 및 규모, 대상 지역의 지질 분포 등을 고려하여 시공성과 경제성 및 안정성을 만족시키는 대책공법의 선택이 필요하다.
- ④ 대책공법 적용사례를 참고로 현장의 제반조건과 각 공법별 시공성 및 경제성 등을 감안하여 사면활동에 대한 개략적인 안정대책공법을 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

제 6 절 요약 및 결론

본 장에서는 한국의 지형과 기후의 특성에 맞춘 공법의 발견을 위해 재해, 이른바 사면붕괴의 피해저감을 위한 방지대책의 연구를 위해 사면붕괴에 대한 방지대책 공법에 대하여 고찰하였다. 그리고 일본, 미국, 홍콩의 사례를 통하여 해외에서 시행되고 있는 사면붕괴 방지대책 공법들을 살펴보았다. 또한 사면붕괴방지 및 사면안정을 위한 신공법에 관하여 고찰하고 나아가 국내 지형과 기후 및 발생 산사태 특성을 고려하여 국외 및 새로 개발된 사면붕괴 방지 공법의 국내적용 가능성을 검토하였다. 연구결과는 다음과 같다.

- ① 산사태 등의 재해 예측지역의 사면안정을 위한 사면붕괴 방지대책 공법으로는 크게 사면안정공법과 사면보호공법으로 나눌 수 있다. 사면안정공법은 절개면 활동에 대한 저항력을 증가시키는 공법과 활동력을 감소시키는 방법으로 크게 나눌 수 있다. 이것은 확보되지 못하고 있는 사면의 안전율을 인위적으로 증가시키는 방법이다. 반면에 사면보호공법은 사면이 보유하고 있는 안전율의 감소를 막기 위한 공법으로서 우수의 침식이나 침투를 방지하거나 혹은 절개면의 풍화 방지를 주목적으로 한다. 보호공법의 또 다른 주된 역할은 주변 자연환경이나 경관과 조화를 이루게 하고 이를 보전하는 것이다.
- ② 국외의 사면붕괴 방지대책에 대한 연구동향과 대책공법현황을 조사한 결과, 일본은 사면붕괴 원인과 활동메커니즘에 따라 억제공법과 억지공법으로 구분하여 적용하고 있다. 미국은 TRB(Transportation Research Board)에서 제시하고 있는 문제 제거, 사면활동력의 감소, 그리고 저항력의 증대라는 3가지 기본원리를 토대로 각각의 경우에 대한 대책공법을 적용하고 있다. 홍콩은 GEO(Geotechnical Engineering Office)에서 토사토면에서의 강우에 의한 지하수위의 상승, 암반사면에서의 절리에 의한 전도, 그리고 지형적인 특성으로 인한 급경사 등을 사면붕괴의 주요 원인으로 규명하고 이에 대한 방지대책공법들을 적용하고 있다.
- ③ 사면붕괴방지 대책을 위한 공법 중 신공법으로 분류되는 것들은 전혀 새로운 형태의 공학적 접근법이 없는 것은 아니지만, 기존의 공법들을 보완 및 개선하는 공법들이 주종을 이루고 있다. 그럼에도 신공법으로 소개되는 것들은 기존 공법의 한계를 극복하고 있다는 점뿐 만 아니라, 사면안정과 사면보호를 동시에 추구한다

는 특징도 가지고 있다. 무엇보다도 신공법은 환경친화적인 공법설계를 통해 자연 보호뿐만 아니라 시각적 효과까지도 고려하고 있다.

- ④ 산사태의 종류별로 발생원인 및 발생 지역의 차이가 있다. 국내 사면활동의 경우, 대부분이 절토구간에서 사면활동이 발생하였으며, 강우에 따른 사면활동이 전체 활동의 85%를 차지하고 있다. 토사구간에서는 원형활동, 암반사면에서는 썩기 및 평면활동이 주로 발생하였으며 암반사면은 활동 후 낙석의 가능성이 높았다. 화성암구간은 암반자체의 활동 가능성은 미약하나 풍화잔류토의 원형활동이 우려되던 변성암구간에서는 수평 및 수직절리, 단층과쇄대 등 불연속면에 의한 썩기활동, 평면활동이 주를 이루고 있었다. 이를 고려하여 산사태 예방공법의 선정하여야 하며 시공성과 경제성 및 안정성을 만족시키는 대책공법의 선택이 필요하다.

재해예측지역에 대한 대책공법의 선택은 우선적으로 현장 지형의 특수성을 고려하여 이루어져야 한다. 본문에서 제시된 공법들 각각의 장단점과 적용가능 지형에 대한 정보를 숙지하여 지형 성격에 맞는 공법을 사용을 결정해야 할 것이다. 그리고 공법의 선택에 있어서 공학적 우수성뿐만 아니라 시공의 경제성과 공법의 환경친화성까지도 고려해야 할 것이다.

제 8 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 목표달성도

1. 현장 모니터링 및 자연사면 수리, 수문특성 분석

가. 자연사면 붕괴 발생현황, 특성 등 조사

자연사면 붕괴 발생현황과 특성을 조사하기 위하여 서울 근교에 산사태 발생이 빈번한 것을 조사하였으며 조사 현장으로 경기도 안성시와 양주시를 선택하였다. 각 장소에서의 산사태 발생 현황과 특성을 조사하여 연구대상지를 선정하였다.

나. 지하수위, 간극수압, 함수상태 등 조사 및 샘플채취

선정된 대상지의 기초적인 조사를 실시하였으며 토층의 물성실험을 위하여 샘플을 채취하였다. 또한 지속적인 모니터링을 위하여 대상지에 함수비 센서와 지하수위계를 설치하여 일정한 시간간격으로 데이터를 수집하였다.

다. 강우에 의한 침투, 유출량 조사

선정된 대상지의 지속적인 모니터링을 통하여 수집된 토양함수비와 지하수위를 바탕으로 침투효과를 조사하였다. 또한 대상지 근교의 관측소의 티센망 형성을 통해 해당 관측소를 결정하고 강우 데이터를 수집하였다.

2. 유발인자 영향 규명(식생, 토질, 지형)

산사태 유발인자 중 식생, 지형, 토질, 침투 효과에 대하여 분석하였다. 식생의 역학적, 수문학적 영향에 관하여 분석하였고 불포화토의 침투특성, 강도 특성 등의 분석을 통해 산사태에 미치는 영향을 연구하였다. 지형 영향 분석을 위하여 고도, 경사도 등 기존의 지형인자의 영향을 살펴보고 지형의 기복을 나타낼 수 있는 프랙탈 차원의 제안을 통해 그 영향을 분석하였다. 또한 수집된 데이터 분석을 통하여 기존의 침투모델의 개선하였고 이는 현장 조건을 잘 모사할 수 있는 것으로 나타났다.

3. 지형패턴 분석을 통한 자연사면 위험성 해석 기법 개발

자연사면에서 지형(굴곡)의 변화에 따른 안전율의 변화추이를 이용하여, 자연사면의 안전율과 평균 경사도로 표현한 평탄사면의 안전율을 비교·분석하였으며 다중셀을 이용하여 사면 굴곡이 안전율에 미치는 영향을 분석하였다.

4. 사면안정성 평가 프로그램 개발

가. GIS/DB 설계 및 자료구축

프로그램에 필요한 기초자료로 수치표고모델, 토양도, 토심분포도 등을 수집 하였으며 및 산사태 위치를 파악하였다. 유역경계추출에 필요한 데이터는 실험이나 현장 계측 그리고 이미 구축되어 있는 데이터를 바탕으로 ArcGIS를 이용해 데이터베이스를 설계 하고 산사태 예측 모델을 위한 자료를 구축하였다.

나. 역학적 기법에 의한 사면안정성 평가 시스템 개발

산사태 위험성 분석을 위한 침투 모델로는 Mein-Larson 모델을 선택하였으며, 시간 별 강우를 고려할 수 없다는 모델의 한계를 극복하기 위하여 수정된 모델을 제안 검증 하였다. 또한 동역학적 모델을 기본으로 한 지표하 흐름 원리를 이용하여 습윤지수를 산출하여 자연사면 재해 위험성을 판단하고자 하였다. 강우사상은 정상강우와 비정상강우 사상을 고려하였으며, 제안한 모델과 기존의 모델과의 비교를 통하여 검증하였다.

다. 현장 적용을 위한 업무용 프로그램 개발

광역산사태 위험성도를 작성하고 예측하기 위하여 지리정보시스템을 이용하여 산사태 예측 모델을 구동시키기 위한 데이터베이스를 구축하고, 사면별 안전율 지도와 소유역별 안전율 지도를 작성하였다. 또한 본 연구에서 개발된 수정된 침투와 지표하 흐름 모델의 적용하여 광역적인 범위의 사면안정성 평가 시스템을 구축하고 대상지역에 적용하여 대상지역에서 실제 발생한 산사태와의 비교를 통해 실효성을 검증하였다.

5. 재해 예측지역에 대한 대안제시

한국의 지형과 기후의 특성에 맞는 재해 예측지역에 대한 대안을 제시하기 위해 일반적 사면붕괴에 대한 방지대책 공법과 해외에서 시행되고 있는 사면붕괴 방지대책 공법 및 새롭게 개발된 신공법에 관하여 고찰하고 나아가 국내 지형과 기후 및 발생 산사태 특성을 고려하여 국외 및 새로 개발된 사면붕괴 방지 공법의 국내적용 가능성을 검토하였다.

제 2 절 관련분야에의 기여도

1. 기술적 측면

가. 지반공학적 측면

사면재해로 인한 피해를 감소시키기 위해서는 우리나라의 강우, 지형, 지질과 같은 환경적 특성을 바탕으로 원인을 규명하고, 사면재해 예상지역에 대한 위험성을 평가하여 적절한 안정대책을 세우는 것이 필요하다. 산사태의 위험성을 경감시키기 위해서는 산사태 발생위험지역에 대한 정확하고 신속한 판단이 중요하다. 특히, 대상지역이 넓고, 경사가 급하며 접근하기 어려운 지역에 대해서는 지형학적 접근이 유리하며, 지리정보체계를 이용하여 산사태의 위험성을 평가하는 것이 필요하다. 본 연구에 의한 학문기술에의 기여효과는 아래와 같다.

- 국내 자연사면에 대한 침투기작, 수분분포 특성 파악
- 산사태 가능성에 대한 시간적·공간적 분석 및 파악
- 역학에 기반을 둔 광역적 사면안정성 평가기법 개발
- GIS와 수문모형, 사면안정모형의 통합

나. 연구인력 양성

수자원, 토양자원, 그리고 산림자원에 대한 친환경적 보전 및 개발의 필요성이 제기되고 있고, 이에 대한 모니터링 및 대책공법 그리고 지속가능한 개발 등의 연구가 수행되고 있다. 따라서, 앞으로 광역적 자원관리 및 재해예측, 대절토사면 및 자연사면안정평가, 모니터링 등의 연구 및 인력양성이 시급하다고 할 수 있다. 원천기술인 GIS 기술, 지반, 수문 및 지질 등에 대한 종합적인 지식, 그리고 국토자원에 대한 관리개념 등에 대한 지식습득으로 이 분야에 대한 필요한 자격을 갖추 수 있을 것이다. 본 연구에 의한 인력양성효과는 아래와 같다.

- GIS 기술, 지반, 수문 및 지질 등에 대한 종합적인 지식을 갖춘 인력을 양성
- 상이분야의 지속적인 석·박사의 배출
- 재해예측 및 자원관리 분야의 인력배출 가능

2. 경제·산업적 측면

우리나라의 사면붕괴는 매년 7-9월 태풍 및 집중호우가 발생하는 시기에 집중적으로 발생하는 것이 특징이며, 인공 및 자연사면에서의 산사태로 인하여 연평균 23명의 사망자(연평균 전체 사망자의 22%정도)와 막대한 재산피해를 초래하고 있다. 또한, 산업화

도시화에 따른 경사지 개발로 인해 산사태 및 사면붕괴로 인한 인명 및 재산피해는 증가하고 있다. 이들 재해는 사전의 산사태 위험성 평가에 따른 대책공법으로 상당부분 감소시킬 수 있다. 실제, Schuster and Leighton에 의하면, 미국 캘리포니아에서는 재해예측, 발생가능지역에 대한 제한 및 규제, 방지대책, 경보시스템 개발 등 일련의 조치들을 이용하여, 사면관련 피해가 90%이상 감소한 것으로 추정하였다. 또한, 장차 개발되거나 변경될 산지에 대한 사전 조사 자료로서 활용하여 비용을 상당히 절감시킬 수 있을 것이다. 본 연구에 의한 사회·경제적인 측면에서의 기여효과는 아래와 같다.

- 산사태 예·경보시스템의 자료로서 활용
- 사면관련 재해가 발생할 수 있는 지역에 대한 개발 제한
- 국토개발계획 및 지역개발정책에 활용
- 산사태 발생지역에 신속한 복구를 위한 자료제공

제 9 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 분야별 활용 계획

1. 기술적 활용

- 역학에 기반을 둔 광역적 사면 안정 평가 기법 및 예측 시스템 개발에 관한 자료 제공
- 기술개발 결과의 적극적 홍보를 통한 관심 극대화

2. 학술적 활용

- 국내외 학술지에 연구결과 발표
- 향후 사면 안정 평가 기법 및 예측에 관한 학술연구의 기초자료 제공

3. 농림분야 활용

- 연구결과의 농어촌 자연사면 안정성 평가로 활용
- 무분별한 농어촌 지역 개발 억제 수단으로의 활용
- 농어촌 지역 산림 환경 조성의 기초기술로의 활용
- 농어촌 지역의 자연경관 및 친환경적 개발을 위한 기술로의 활용

제 2 절 기관별 활용계획

기 관 명	활 용 유 형
국가기관	<ul style="list-style-type: none"> ○ 거시적인 국토개발계획 정책수립을 위한 자료제공 및 의사결정지원 ○ 산지자원 재해 위험도 맵 구축에 의한 국토자원관리 ○ 정부 산하기관과 연계한 지역개발정책 수립
정 부 산하단체	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산지에 대한 절·성토계획, 산업입지 선정, 산지개발, 택지개발, 토양 형질 변경 등이 요구되는 곳에서 자연재해를 예측을 위한 대한 정책적 판단에 대한 의사결정지원 ○ 지방자치단체와 연계한 산지 개발사업 수행 및 개발억제 기준 마련 ○ 중·장기적인 계획 수립
지 방 자치단체	<ul style="list-style-type: none"> ○ 자치단체에서 자연경관의 보전 및 친환경적 개발을 위한 의사결정지원 ○ 적지판정 및 무분별한 개발 억제 수단

Reference

1. Kim, W. K., Chang, P. W., & Cha, K. S., 2006, Estimation of saturation depth by reflecting water-redistribution phenomena at a natural slope, *Journal of Korean society of Agricultural Engineers*, 48(1), p.71
2. Fredlund, D. G., & H. Rahardjo, 1995, Soil mechanics for unsaturated soils, *John Wiley & Sons Inc.*
3. Green, W. H., & C. A. Ampt, 1911, Studies on soil physics, I. Flow of water and air through soils, *Journal of Agricultural Science*, 4, pp. 1~24
4. Morel-Seytoux, H. J., P. D. Meyer, M. Nachabe, J. Touma, M. T. van Genuchten & R. J. Lenhard, 1996, Parameter equivalence for Brooks-Corey and van Genuchten soil Characteristic: Preserving the effective capillary drive, *Water Resource. Research*, 32(5), pp. 1251~1258
5. Ng, C. W. & Q. Shi, 1998, Numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage, *Computer and Geotechnics*, 22(1), pp. 1~28
6. van Genuchten, M. Th., 1980, A closed-form equation of predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, pp. 892~898
7. 차경섭(2004), “다중셀과 지형지수를 이용한 광역 산사태 위험지 예측”, 박사학위논문, 서울대학교
8. Gasmol, J. M., Rahardjo, H. and Leong, E. C.(2000), “Infiltration effects on stability of a residual soil slope”, *Computers and Geotechnics* 26, pp. 145~165
9. Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E.(1994), “A physically based model for the topographic control on shallow landsliding”, *Water Resources Research*, Vol.30,

No.4, pp. 1153~1171

10. Okimura, T., and Ichikawa, R.(1985), “A prediction method for surface failures by movements of infiltrated water in a surface soil layer”, *Nat. Disaster Sic.*, 7, pp. 41~51
11. Terlien, M. T. J.(1996), “Modelling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides”, Ph. D. thesis, ITC Publ. Nr. 32, The Netherlands, 254
12. Van Westen, C. J. and Terlien, M.T.J.(1996), “An approach towards deterministic landslide hazard analysis in GIS, a case study from Manizales (Colombia): *Earth Surface Processes and Landforms*”, Vol. 21, pp.853~868 - John Wiley, London
13. Wu, W., and Sidle, R. C.(1995), “A distributed slope stability model for steep forested basins”, *Water Resources Research*, Vol.31, No.8, pp. 2097~2110
14. 박미정, 이정재, 2005, 프랙탈 기법을 이용한 3차원 지형의 다중 추상화, 한국농촌계획학회, 제11권, 제1호, pp. 9~15.
15. 이도원, 2001, 경관생태학: 환경계획과 설계, 관리를 위한 공간생리, 서울대학교출판부, 서울.
16. 조수민, 2005, 자연지형 정지가 사면안정성 및 식생발달에 미치는 영향에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문
17. 차경섭, 2004, 다중셀과 지형지수를 이용한 광역 산사태 위험지 예측, 서울대학교 박사학위논문.
18. Clarke, Keith C., 1986, Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method, *Computers & Geoscience*, Vol. 12, No. 5, pp. 713~722.
19. Cox, B. Lea and Wang, Y. S. Y., 1993, *Fractal surfaces: Measurement and*

applications in the earth sciences, *Fractals*, Vol. 1, No. 1, pp. 87~115.

20. Forman, R. T. T. and M. Godron, 1986, *Landscape Ecology*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY
21. Mandelbrot, B. B., 1982, *The fractal Geometry of Nature*, Freeman and Co., San Francisco.
22. Sugihara, G. and May, R. M., 1990, Application of fractals in ecology, *Trends in Ecology and Evolution*, Vol. 5, No. 3, pp. 79~86
23. 김영삼, 2002. GIS를 이용한 산사태 취약지분석, 서울대학교 석사학위논문
24. 차경섭, 2004. 다중셀과 지형지수를 이용한 광역 산사태 위험지 예측, 서울대학교 박사학위논문
25. Iida, T., 1999. A stochastic hydro-geomorphological model for shallow landsliding due to rainstorm, *Catena* Vol.34, pp. 293~313
26. Lee, S., Chwae, U., Min, K., 2002. Landslide susceptibility mapping by correlation between topography and geological structure: the Janghung area, Korea, *Geomorphology* 46, pp. 149~162
27. Park, S., McSweeney, K., Lowery, B., 2001. Identification of the spatial distribution of soils using a process-based terrain characterization, *Geoderma* 103, pp. 249~272
28. Cho, S. E. & S. R. Lee, 2000, Surficial stability evaluation of homogeneous slopes considering rainfall characteristics, *Journal of Korean Geotechnical Society*, 16(5): pp. 107~116

29. Chu, S. T., 1978, Infiltration during an unsteady rain, *Water Resource. Research*, 14(3), pp. 461~466
30. Chu, X. & M. A. Marino, 2005, Determination of ponding condition and infiltration into layered soils under unsteady rainfall, *Journal of Hydrology*, pp. 1~13
31. Fredlund, D. G. & H. Rahardjo, 1995, *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons Inc.
32. Green, W. H., & C. A. Ampt, 1911, Studies on soil physics, I. Flow of water and air through soils, *Journal of Agricultural Science*, 4, pp. 1~24
33. Kim, K. H., 1993, A simulation model for estimating rainfall interception loss in a forest stand, Ph.D. thesis, Seoul National University.(in Korean)
34. Morel-Seytoux, H. J., P. D. Meyer, M. Nachabe, J. Touma, M. T. van Genuchten & R. J. Lenhard, 1996, Parameter equivalence for Brooks-Corey and van Genuchten soil Characteristic: Preserving the effective capillary drive, *Water Resource. Research*, 32(5), pp. 1251~1258
35. Ng, C. W. & Q. Shi, 1998, Numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage, *Computer and Geotechnics*, 22(1), pp. 1~28
36. van Genuchten, M. Th., 1980, A closed-form equation of predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, pp. 892~898

주 의

1. 이 보고서는 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.