

산불의 영향을 고려한 산지사면의 안정성 평가

Safety Evaluation of Mountain Slopes Considering the Effect of Forest Fire

김종민* / 정봉훈** / 최준성*** / 박덕근****

Kim, Jongmin / Chung, Bong-Hoon / Choi, Joon-Sung / Park, Duk-Keun

Abstract

Recent abnormal weather condition and accompanying increase in forest fire require more study on the effect of forest fire on the stability of mountain slopes. The aims of this paper are to investigate how destroy of trees caused by forest fire influences the stability of mountain slopes and to propose a safety evaluation method for mountain slopes considering the effect of forest fire, in order to minimize the expected damage due to forest fire. To accomplish this aim, the effects of forest fire on the stability of mountain slopes are analyzed in quantitative way, and a slope stability chart is proposed as a result.

Key words : Slope stability, Forest fire, Vegetation, Stability number, Stability chart

요 지

최근의 엘니뇨와 라니냐 등 이상기온현상과 이에 따른 산불발생빈도의 증가는 산지사면의 안정성에 대한 산불의 영향을 고려해보게 되는 계기가 되고 있다. 본 논문에서는 산불로 인한 식생의 파괴에 따른 자연사면 안정성에 미치는 정도를 규명하고, 산불에 따른 사면의 안정성을 평가하는 방법을 제시하여 산불로 인하여 발생할 수 있는 피해를 최소화하는데 그 목적이 있다. 본 논문에서는 산불로 인한 산지사면 식생의 변화가 사면 안정성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였고, 그 결과로 산불의 영향을 고려한 사면안정도표를 제안하였다.

핵심용어 : 사면안정, 산불, 식생, 안정수, 안정도표

1. 서 론

우리나라는 지형 윤회상 만장년기의 지형에 속하기 때문에 급경사면이 많으며 계류의 길이가 길어 산사태 발생이 빈번하다. 또한 강수량도 년강수량의 대부분이 7~9월에 집중적으로 내리기 때문에 이 기간동안 많은 피해를 입고 있다(정원옥, 1997). 한편 산사태 발생의 인위적인 원인으로는 무분별한 산지개발에 따른 산림 훼손을 들 수 있으며 임지이용상태에 따라 피해의 정도와 피해감수성을 달리한다. 이러한 자연적, 인위적인 원인과 더불어 건조기의 산불발생으로 인해 사면안정에 영향을 주는 식생인자들과 지반의 조건들이 변하게 된다. 특히 최근의 엘니뇨와 라니냐 등 이상기온현상과 이에 따른 산불발생빈도의 증가는 산지사면의 안정성

에 대한 산불의 영향을 고려해보게 되는 계기가 되고 있다. 산불은 과거부터 오늘날에 이르기까지 도·남벌과 함께 산림의 인위적인 피해 가운데 가장 큰 물리적인 피해를 가져올 뿐만 아니라, 산림의 원초적인 기능을 마비시키는 피해로써 단시간에 넓은 범위를 연소시키고 생태계를 이루는 생물, 미생물, 토양, 경관, 임지환경, 식물의 생리과정과 수목성장 등의 모든 환경전반에 걸쳐 영향을 미친다. 산불의 종류는 연소위치와 강도에 따라 구분되며, 산불피해 상황은 임상과 토양의 건습도에 따라 차이가 심하다.

산지사면의 안정성에 영향을 미치는 여러요소 중 산불 발생의 영향을 가장 많이 받는 요소로는 식생의 변화를 들 수 있다. 식생은 사면안정성을 증가시키는 역할을 수행하는 바, 산불피해를 입을 경우 강우시 산사

* 정희원, 세종대학교 토목환경공학과 조교수 (jongmin@sejong.ac.kr)

** 다산이엔지 지반부 대리

*** 인덕대학 토목환경설계과 조교수

**** 국립방재연구소 연구관

표 1. 산불 종류에 따른 사면 안정에 미치는 영향

산불의 종류	지피물에 의한 강우차단	수목에 의한 강우차단	뿌리에 의한 전단강도 증가
산불발생전	○	○	○
지표화 발생	○	×	×
수관화 발생	×	○	○
지표화+수관화	×	×	×

태 발생가능성이 높아지게 된다. 따라서 본 논문에서는 산불로 인한 산지사면 식생의 변화가 사면 안정성에 미치는 영향을 기존 자료분석과 수치해석을 통하여 정량적으로 분석하고, 분석 결과를 이용하여 산불의 영향을 고려한 사면안정도표를 제안하고자 한다.

2. 연구범위 및 제한사항

산불의 영향을 고려한 산지사면의 안정성 평가를 위해서는 산불의 특성과 그로 인한 산지사면의 안정성에 끼치는 영향을 산정해야한다. 본 논문에서는 산불로 인한 산지사면의 식생변화가 사면안정에 미치는 영향을 분석하기 위해 우선 (i)산불의 종류와 식생이 사면 안정에 미치는 영향에 대하여 살펴보고 (ii)산불의 종류에 따른 식생의 피해정도를 규정하였다. 산지사면의 붕괴는 강우침투와 이에 따른 지하수위 상승에 의해 주로 발생하게 되는데, 식생은 증발산 작용을 통해 강우를 차단함으로써 사면붕괴를 방지하는 역할을 수행한다. 또한 식생의 뿌리는 일종의 보강효과를 발현하여 사면 안정성을 증가시킨다. 따라서 산불발생으로 인한 식생의 피해 정도에 따라 사면안정성이 변화된다.

산불은 사면의 지표면에서 연소되는 지표화와 나무 줄기부분에서 연소되는 수관화로 나눌 수 있다. 산불의 종류와 그에 따른 식생의 피해정도를 규정하기 위해서 기존의 문헌(산림청, 1997)을 조사·정리한 결과 산불의 종류에 따른 식생의 피해정도를 표 1과 같이 정리할 수 있다. 표에서 강우차단효과는 우보명(1977, 1983, 1985, 1989)의 연구를 토대로 하였으며, 이에 따라 지피물에 의한 강우차단 효과와 수목에 의한 강우차단 효과는 각각 강우량의 20%로 가정하였다.

3. 산불의 영향을 고려한 산사태 위험 판정

본 논문에서는 산불이 산지사면의 안정성에 미치는 영향에 관하여 앞절에서 논의한 바와 같이 산불의 연소 상태와 피해 형태에 따라 구분된 산불의 종류와 그에 따라 변하게 되는 식생의 사면보강효과를 고려하여 수치해석을 실시하였다. 식생에 의한 사면보강효과는

크게 뿌리에 의한 전단강도 증가에 따른 사면파괴에 대한 저항력의 증가와 지피물과 수목에 의한 강우차단 효과에 의한 간극수압의 감소의 두 가지로 나누어 생각할 수 있다. 그러나 아직까지 우리나라에서는 나무의 종류에 따른 뿌리에 의한 전단강도의 증가량에 관한 연구·조사 결과가 없어 본 논문에서는 뿌리에 의한 전단강도 증가량에 관한 내용을 제외하고 산불의 종류에 따라 식생의 강우차단효과가 달리 적용된다는 내용만을 고려하여 수치해석을 실시하였다. 아직까지 산불의 영향을 고려하여 산지사면의 안정성을 평가한 자료도 없는 상태이고 문헌조사에 의존한 탓에 본 논문에서는 산불의 종류에 따른 사면안정의 변화에 대하여 산불의 영향을 고려한 산지사면의 안정성을 정량적으로 평가하는 방법을 제시하는데 그 목적이 있다. 평가 방법으로는 안정수 개념을 이용한 안정수 도표 평가 방법을 이용하였다.

산림청(1997)에서 제시한 자연사면의 붕괴위험도 판정기준표의 7개의 인자(경사길이, 모암, 경사위치, 임상, 사면형, 토심, 경사도)중에서 산불에 의하여 영향을 받는 인자는 임상, 경사길이, 토심, 경사도의 4가지로 가정하였다. 4가지의 인자 중 산불의 직접적인 영향을 받는 인자는 임상이며 경사길이, 토심, 경사도의 3가지 인자는 산불 발생 후 강우에 의한 토석류로 인해 영향을 받는 인자로서 산불의 간접적인 영향을 받는 인자로 구분하였다.

본 논문에서는 이러한 산불영향인자를 고려한 사면 안정성 평가방법으로 안정수 개념을 도입한 안정수도표 활용방안을 제시하였다. 안정수는 경사길이, 토심, 경사도의 산불에 의해 간접적으로 영향을 받는 인자에 대해서도 고려하는 무차원계수로서 다양한 인자들을 고려할 수 있으며, 정량적인 안정검토가 가능하다.

4. 산불의 영향을 고려한 안정수도표 제시

4.1 해석조건 및 가정사항

본 논문의 목적은 산불의 영향을 고려한 산지사면의 안정성 평가를 위한 방법을 제시하는 것이다. 따라서

본 절에서는 안정수 개념을 이용하여 안정수 도표를 제시하고 그 활용방안을 제시한다.

안전율을 계산하기 위해서는 기본적인 지반물성치인 점착력, 단위중량, 토심과 사면경사에 대한 변수들이 필요하게 된다. 만약 사면의 경사각이 일정하다고 하더라도 안전율은 식 (1)과 같이 점착력, 단위중량, 토심의 함수가 된다.

$$F_S = f(c, \gamma, H) \text{ for a constant } \beta \quad (1)$$

여기서, F_S =안전율, c =점착력, γ =단위중량,
 H =토심, β =사면경사

안전율 공식이 점착력, 단위중량, 토심의 변수로 이루어진 함수라고는 하여도 이 변수들은 무수히 많은 경우의 수를 가지게 되는 문제점이 발생하게 된다. 이런 무수한 변수들로 인해 수많은 안전율이 생기게 되어 안전율을 정량화하기가 매우 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 다음의 식 (2)와 같은 안정수 개념을 도입한 안정수 도표 활용방안을 제시하였다.

$$N_F = \frac{\gamma H}{c} F_S \quad (2)$$

여기서, N_F =안정수

식 (2)의 안정수 공식은 사면의 활동을 일으키는 요소인 단위중량과 토심의 곱과 반대로 사면의 활동을 억제하는 요소인 점착력의 비로 표시된다. 식에서 보듯이 안정수는 안전율의 비를 나타내는 무차원 계수에 해당한다. 만약 사면의 점착력이 일정하다고 할때 사면의 활동을 일으키는 힘을 표시하는 무차원계수의 분자부분(γH)이 계속하여 증가하면 안전율은 계속하여 감소하게 된다. 이와 반대로 사면의 활동을 일으키는 무차원계수의 분자부분이 일정하고 사면의 활동을 억제하는 무차원계수의 분모부분인 점착력이 증가하게 된다면 이번에는 안전율이 증가하게 된다. 이렇게 사면의 여러 강도정수를 포함한 무차원계수로 인해 각기 다른 조건의 강도정수를 가지는 사면에 생길 수 있는 안전율의 값을 안정수로 나타낼 수 있는 것이다. 만약 안정수(N_F)가 4라고 한다면 안정수공식의 변수들은 각각 여러 가지의 값을 가질 수 있다. 다시 말해 단위중량이 2kN/m^3 , 토심이 2m 그리고, 점착력이 0.5kN/m^2 인 사면의 안전율이 2이라고 할 경우 안정수는 16이 된다. 또 단위중량이 4kN/m^3 , 토심이 2m 그리고, 점착력이

0.5kN/m^2 인 사면의 안전율이 1인 경우도 안정수는 16이 된다. 이처럼 하나의 안정수 값은 무수히 많은 변수들을 만족시키므로 실제의 사면에서 발생할 수 있는 여러 가지 강도정수에 대하여 안정수개념을 적용하여 안전율을 산정할 수 있는 것이다. 본 논문에서는 토심과 점착력을 동일한 값을 두고 단위중량을 10kN/m^3 으로 변수값을 대입하여 무차원 계수의 값을 10으로 가정하였다. 따라서, 식 (2)로부터 $N_F = 10 F_S$ 의 관계가 성립되므로 수치해석을 실시하여 구한 안전율로부터 안정수를 산정해냈다.

본 논문의 안정수도표 작성을 위한 수치해석 프로그램은 사면의 안전율해석 프로그램인 PCS-TABL6 (Bandini et al., 1999)를 사용하였다. 수치해석을 하기 위한 사면의 형상은 산림청(1996)이 제시한 자연사면 붕괴위험도 판정기준의 7가지 요소 - 경사길이, 모암, 경사위치, 임상, 사면형, 토심, 경사도 - 중 프로그램 조건을 만족하는 경사길이, 토심, 경사도의 각각 3가지 경우의 대표값을 산정하고, 산불의 형태 - 산불이 없을 경우, 지표화 또는 수관화가 발생하였을 경우, 지표화와 수관화가 동시에 발생하였을 경우의 - 3가지 경우를 적용하여 총 192가지 경우에 대하여 프로그램 해석을 실시하였다. 산불형태에 따른 강우차단효과는 표 1을 이용하여 고려하였다.

프로그램 해석을 위한 데이터선정은 기존의 산림청(1997)에서 제시한 자연사면의 위험도판정 기준표를 이용 각각의 7개 인자의 category별 점수에 해당하는 데이터를 사용하였다. 기존의 자연사면의 위험도 판정 기준표를 참고로 수치해석에 사용된 데이터들이 표 2에 나타나있다.

강우 조건에 대해서는 가장 위험한 상황을 가정하기 위하여 기상청자료 중에서 속초지방에 1984년 9월 02일에 내린 최대일강우량을 기준으로 하여 식생에 의한 강우 차단없이 100% 모두 침투하였다고 가정하였을 때 강우 침투에 의한 침투 포화대 깊이를 지표면으로부터 30cm로 가정하였다. 실제의 경우 강우의 침투량은 100% 침투되는 것이 아니라 포화투수계수의 크기에 따라 침투 가능한 양만 침투되나 본 해석에는 가장 위험한 경우의 조건을 고려하기 위하여 강우가 100% 침투하는 것으로 가정하여 해석하였다. 강우 최대침투포화깊이 30cm를 기준으로 산불이 없을 경우에는 지표면으로부터 18cm가 강우침투에 의해 포화된 부분이라고 정하였고, 지표화나 수관화중에서 한가지 종류의 산불만이 발생하였을 경우에는 총 20%의 강우 차단만이 일어나므로 강우의 침투에 의한 포화 깊이를 지표

면 아래 24cm로 그 포화영역을 정하였다. 그리고 지표 화와 수관화가 동시에 발생하였을 경우에는 지피물과 수목에 의한 강우 차단효과가 모두 소실되는 가장 위험한 상황을 고려하기 위하여 100%의 강우가 모두 침투한다고 가정하고 강우 침투에 의하여 지표면으로부터

터 30cm 아래까지 포화되는 것으로 산불에 따른 식생 변화를 고려한 수치해석을 실시하였다. 위의 강우 침투 조건을 표 3에 정리하였다. 그리고, 해석사면에 대한 모식도를 그림 1에 나타내었다.

표 2. 입력변수 및 대표값

입력 변수	대표 입력값
경사도	15° 25° 35° 45°
사면의 길이(m)	50, 100, 150, 200
토심(m)	0.2, 0.5, 0.8, 1.1

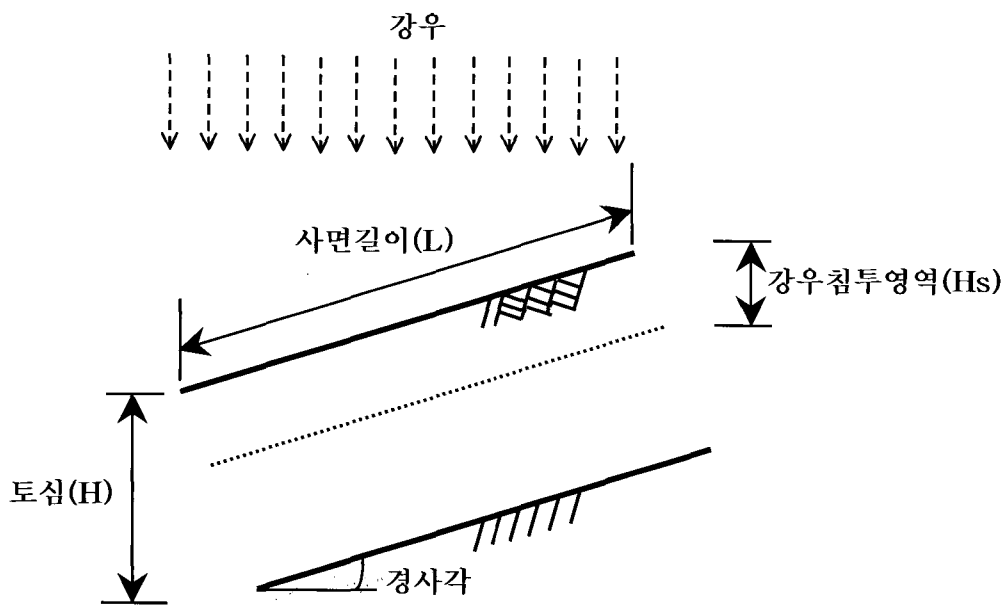


그림 1. 해석 모델 예시도

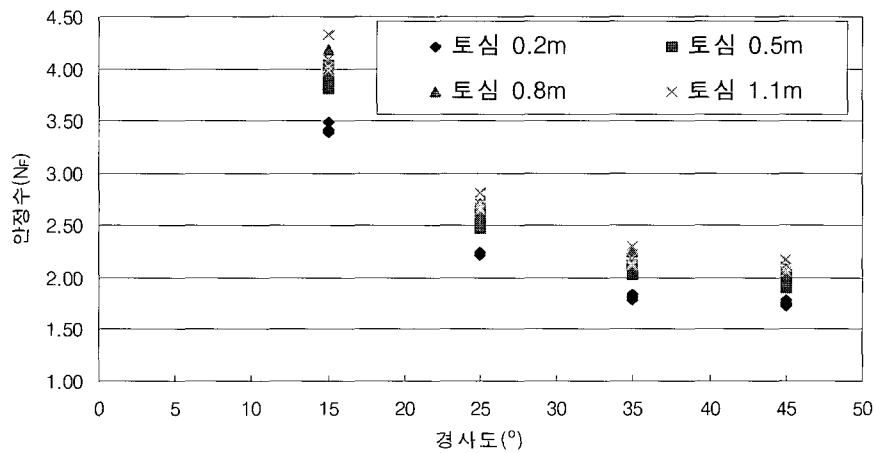


그림 2. 산불 발생전 안정수도표

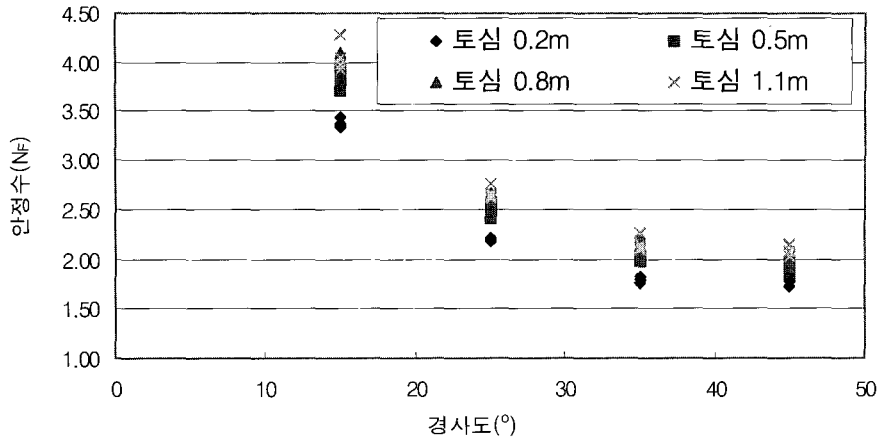


그림 3. 지표화 또는 수관화가 발생했을 경우의 안정수도표

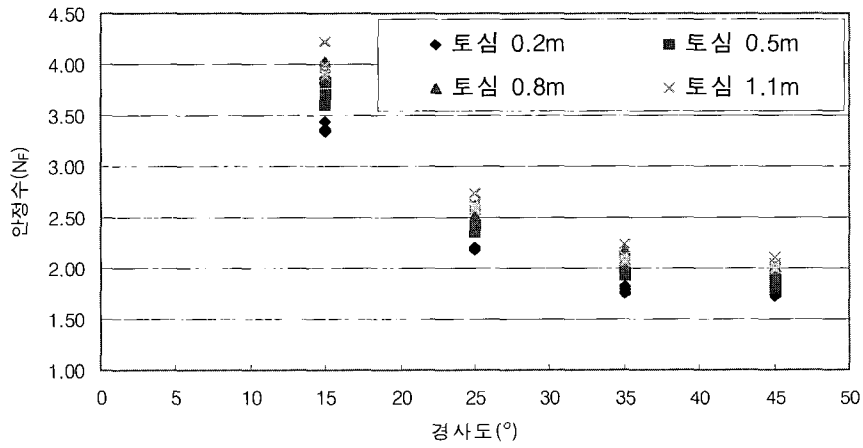


그림 4. 지표화와 수관화가 동시에 발생했을 경우의 안정수도표

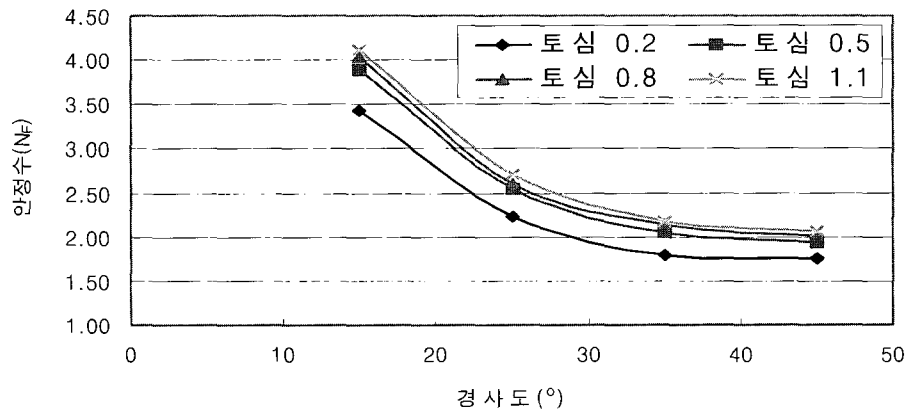


그림 5. 산불이 발생하지 않을 경우 안정수도표 (평균값)

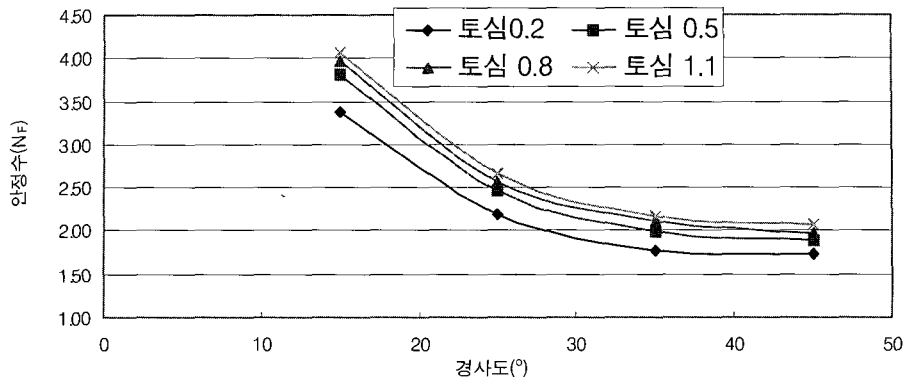


그림 6. 지표화 또는 수관화가 발생했을 경우 안정수도표(평균값)

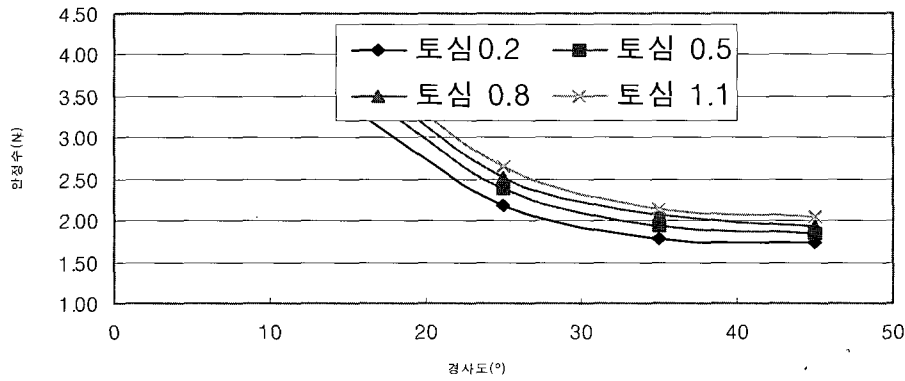


그림 7. 지표화와 수관화가 동시에 발생할 경우의 안정수도표(평균값)

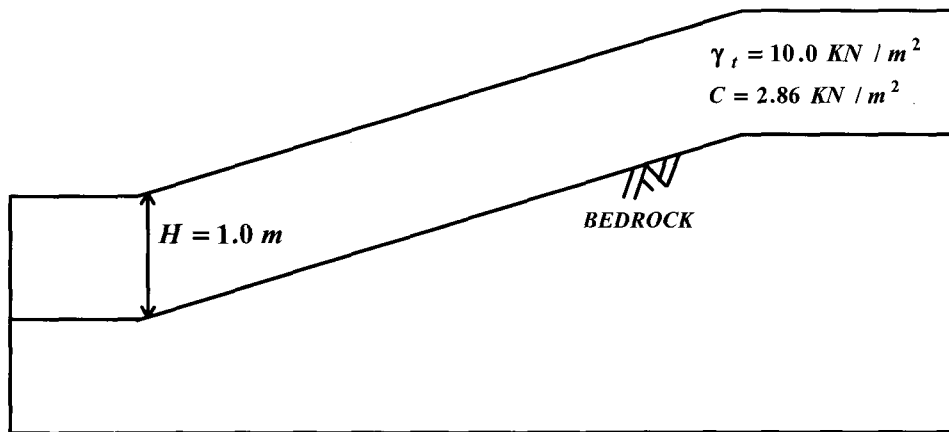


그림 8. 안정수도표 적용을 위한 예제사면

강우 침투해석을 하기 위하여 그림 1에서 강우가 침투하여 포화된 부분(Hs)에 대해서는 포화단위중량, $\gamma_{sat} = 12.5 \text{ kN/m}^3$ 값을 대입하였고, 강우 침투가 이르지 못한 부분(H-Hs)에 대해서는 습윤단위중량 $\gamma_t = 10 \text{ kN/m}^3$ 값을 대입하여 강우 침투해석을 실

시하였다. 또한 가장 위험한 상태를 고려하기 위하여 포화된 강우의 배수가 이루어지지 않는 비배수 조건 ($\phi = 0$)을 가정하였다. 그리고 지반의 강도정수 중 점착력은 모든 지반 조건에서의 해석이 가능할 수 있도록 토심과 같다고 가정하였다. 이러한 입력변수로부

터 산정된 안전율을 가지고 안정수 값을 구한다. 토심과 점착력이 같다고 하였으므로 식 (2)에 의해 산정되는 안정수는 $N_F = \gamma F_S$ 가 된다. 이러한 조건으로 수치해석한 결과를 그림 2~4에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 경사길이에 대한 안전율의 차이가 매우 작은 것을 알 수 있다. 안정수도표의 활용성을 높이기 위하여 경사길이에 대한 안정수값들을 평균화하여 그림 5~7과 같이 안정수도표를 제작하였다.

4.2 안정수 도표의 활용방법

수치해석을 통하여 구한 안정수 도표를 이용하여 산불의 영향을 고려한 산지사면의 안정성을 평가하기 위하여 그림 8과 같은 사면을 고려해보기로 한다. 그리고 예제사면에는 면적비(=뿌리 면적/전단면적)가 0.00045인 밤나무가 조성되어 있다고 가정한다.

안정수도표 작성시에는 강우차단효과만을 고려하여 수치해석을 실시하여 안정수도표를 작성하였으나 본 예제에서는 산불의 종류에 따른 뿌리에 의한 전단강도 증가에 대한 사항이 어떻게 고려되는지 보여주고 있다.

뿌리에 의한 전단강도 증가량을 산정하는 방법은 임충모(1997)의 자료 중에서 뿌리의 면적비를 알 수 있는 경우에 그림 9를 이용하는 방법을 사용하여 전단강도 증가량을 산정한다. 예제사면에는 면적비가 0.00045인 밤나무가 조성되어 있다고 하였으므로 그림 9를 이용하여 뿌리에 의한 전단강도 증가량(ΔS_R)을 산정한다. 면적비가 0.00045인 밤나무의 전단강도 증가량, $\Delta S_R = 3.14kN/m^2$ 이 된다.

우선 산불이 발생하기 전의 안전율을 산정하기 위하여 그림 10의 산불이 발생하기 전의 안정수 도표를 이

용하여 안정수 값을 구한다. 토심이 1m이고 경사도가 30°이므로 그 값에 맞는 값을 그래프에서 읽는다. 그림 5에서 구한 산불이 발생하기 전 예제사면의 안정수는 2.40이다. 그 다음 안정수 공식에 모든 수치를 대입하여 안전율을 구한다. 여기서 주의하여야 할 사항은 점착력에 뿌리에 의한 전단강도 증가량을 더하여 계산해야 한다는 점이다. 식 (2)로부터 안전율을 역산하면 산불 발생 전의 안전율은 1.44이다. 예제사면에 수관화가 발생했을 경우의 안전율을 산정하기 위하여 산불이 발생하기 전의 방법과 동일한 방법으로 구한다. 그림 6의 수관화가 발생했을 경우의 안정수 도표를 이용하여 구한 안정수는 2.30이므로 안정수 공식에 대입하여 안전율을 산정하면 1.38임을 알 수 있다. 따라서 수관화가 발생하게 되면 안전율이 1.44에서 1.38로 감소하게 된다. 마지막으로 예제사면에 지표화와 수관화가 동시에 발생했을 경우의 안전율을 구한다. 이 경우에도 안정수를 구하는 방법은 위의 두 경우와 동일하다. 다만 지표화가 발생하게 되면 뿌리까지 모두 소멸된다는 가장 위험한 가정하에 지표화와 수관화가 동시에 발생했을 경우에는 뿌리에 의한 전단강도 증가량을 계산에 고려하지 않는다는 점이 위의 두 경우와 크게 다른 점이다. 그림 7을 이용하여 지표화와 수관화가 동시에 발생했을 경우 안정수 2.20을 구하였다. 구한 안정수를 안정수 공식에 대입하여 안전율을 구하게 되는데 지표화가 발생하게 되면 뿌리에까지 영향을 미쳐 뿌리에 의한 전단강도 증가량이 소실되므로 뿌리에 의한 전단강도 증가량을 제거한 후 안전율을 산정한다. 지표화와 수관화가 발생하였을 경우의 안전율은 0.63이 된다.

번호	수종
1	오리나무
2	단풍나무
3	미나리나무
4	밤나무
5	도토리나무
6	전나무
7	Rocky Mountain Douglas Fir
8	아카시아
9	반얀나무
10	4, 5, 8의 평균

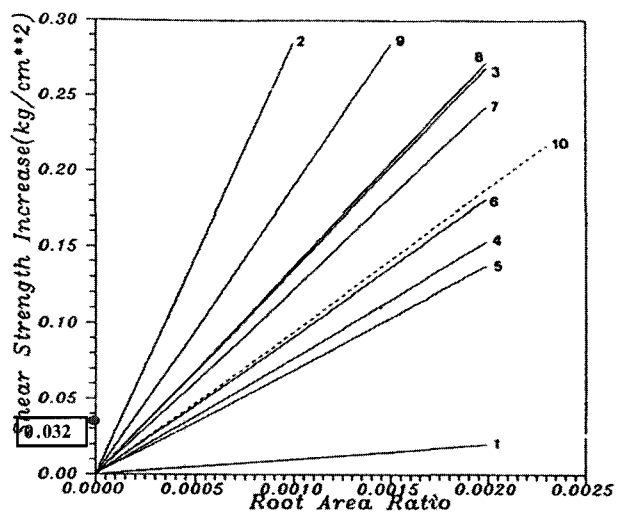


그림 9. 뿌리에 의한 전단강도 증가량 산정 도표

본 예제를 통하여 산불의 종류에 따라 안전율이 감소함을 확인할 수 있었다. 우리나라 산림내의 식생에 관한 연구가 다양하게 실시되어 많은 자료가 확보된다면 실제 현장에서 적용할 수 있는 안정수 도표를 제시하게 되어 이 안정수 도표를 이용하여 산불에 대비한 예방책을 마련할 수 있을 것이다.

5. 결 론

아직까지는 산불과 산지사면의 안정성에 관한 직접적인 실험이나 연구가 역학적인 관점으로 연구된 경우가 부족한데다가 특히 우리나라의 산림에 대한 충분한 연구자료가 없는 이유로 정량화된 수치를 제시하지는 못하였지만 본 논문은 국내의 문헌조사를 통하여 얻어진 결과를 토대로 수치해석을 통하여 산불의 종류에 따라 식생의 사면안정 보강효과가 변화되는 것을 고려한 안정성 평가 방법을 제시하였다. 식생이 사면안정에 미치는 영향을 크게 강우차단작용에 의한 간극수압 감소효과와 뿌리의 전단강도증가 작용에 의한 저항력 증가효과의 크게 두 가지로 나누어 고려하였다. 하지만 본 논문에서는 우리나라 식생의 뿌리에 관한 자료가 없는 관계로 프로그램 해석시에는 강우차단효과의 변화에 대해서만 고려하여 해석을 실시하였다.

- (1) 본 논문에서는 문헌조사 결과를 기반으로 지피 물에 의한 강우차단효과를 강우량의 20% 그리고 수목에 의한 강우차단효과를 강우량의 20%라 정하여 수치해석을 실시하였다.
 - (2) 본 논문에서는 산불에 따른 사면안정해석 평가 방법으로 안정수 개념을 이용한 안정수 도표 방법을 제안하였고, 예제를 통하여 해석방법에 대한 타당성을 입증하였다.
- 본 논문에서는 실험을 통한 자료의 획득없이 기존의

문헌조사만을 토대로 하여 수치해석을 하고 그에 따른 평가방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 안정수 도표를 이용하는 방법이나 산불의 영향을 고려한 자연사면의 붕괴위험도 판정표등이 실제 현장에서도 적용되기 위해서는 우리나라 산지의 여러 수종을 조사하고 각각의 수종의 뿌리에 의한 전단강도 증가량과 강우차단효과에 관한 정밀한 조사와 실험이 이루어져야한다.

참 고 문 헌

- 산림청 임업연구원(1996), 고성산불지역 생태조사 결과 보고서
- 산림청 임업연구원(1997), 고성산불지역 생태조사 결과 보고서
- 우보명(1977), “식생이 비탈면의 안정에 미치는 영향” 한국임학회지, 제35호, pp. 47~55,
- 우보명(1983), “관악산지에서의 산불이 삼림식생 및 토양에 미치는 영향에 관한 연구(I)” 한국임학회지, 제62호, pp43~52
- 우보명(1985), “관악산지에서의 산불이 삼림식생 및 토양에 미치는 영향에 관한 연구(II)” 한국임학회지, 제68호, pp37~45
- 우보명(1989), “관악산지에서의 산불이 삼림식생 및 토양에 미치는 영향에 관한 연구(IV)” 한국임학회지, 제78권 3호, pp 302~313
- 임충모(1997), “뿌리의 강도저하와 지하수위 변화를 고려한 산사태 위험도 연구” 고려대학교 박사학위 논문
- 정원옥(1997), “산불이 토양침식 및 계류수질과 식생변화에 미치는 영향” 경상대학교 학위논문
- Bandini, P. and Salgado, R.(1999), PCSTABL6 User's Manual, Purdue University