韓國地形空間情報學會誌 第14卷 第3號 2006年 9月 pp. 55-62

연구논문

지형공간 정보를 활용한 산사태 안정평가의 확률론적 해석

Probabilistic Analysis for Stability Evaluation of Landslides Using Geo-spatial Information

박병수*

Park, Byung Soo

要 旨

본 연구는 산사태의 발생 가능성을 평가하기 위하여 지형공간 정보를 활용하여 지형자료를 구축하고, 힘의 평형으로 유도된 무한사면 안정해석모델을 적용하여 산사태 가능성을 정량적인 안전지표로 평가하였다. 또한, 해석모델에 입력인자의 불확실성을 고려할 수 있는 확률변수 개념을 도입하여 신뢰성 이론에 근거를 둔 산사태의 확률론적 분석법을 연구하였다. 이러한 해석방법의 적용성을 검토하기 위하여 실제 현장자료로부터 지형정보와 토질 조건 등을 획득하고, 넓은 지역에 대한 개략적 평가를 위한 전체해석과 세밀한 결과 도출을 위한 상세해석을 실시하였다. 이를 통하여 전반적인 산사태 발생 가능성 경향, 산사태 가능성이 높은 상세해석 구간 선정 및 상세구간에서의 보다 높은 정도의 산사태발생 가능성을 안전율과 파괴확률의 안정지표로 분석할 수 있었다.

핵심용어 : 지형공간 정보, 산사태, 무한사면 안정해석, 확률론적 해석, 파괴확률

Abstract

The purpose of the current research is to evaluate the possibility of landslides by using geo-spatial information system. Geological information has been summarised and stability analysis for infinite slopes has been conducted based on the force equilibrium. In addition, the analysis of landslides was performed based on probabilistic approach by using probabilistic variables which can include uncertainty of input parameters. For the purpose of testifing the applicability of the analysis method actual geological data from a construction site was obtained, thereby performing both a preliminary analysis for a large area and detailed analysis for a better result. As a result of the current analysis several issues such as the possibility of development of landslides, detailed analysis of where landslides are most likely to be developed were analysed by using two concepts of safety and index of failure probability.

Keywords : Geo-Spatial Information, Landslide, Infinite Slope Stability Analysis, Probabilistic Analysis, Probability of failure

1. 서 론

우리나라는 지형 윤회상 만장년기의 지형으로 전 국토의 70%정도가 산지로 되어 있고, 산지 경사면이 대부분 급경사면으로 이루어져 있으며, 토층의 두께가 얇은 층상구조를 가지고 있다. 또한, 연평균 강우량이 1,300mm~1,500mm정도로 대부분 우기철인 7월과 8월 사이에 집중적으로 내리는 강우특성을 가지고 있다. 우리나라의 이러한 환경조건은 산사태의 발생의 잠재적인 요인으로 작용하고 있으며, 매년 그 피해가 적지 않게 발생하고 있다. 이와 같은 국내의 산사태 발생에 대한 취약한 자연환경 여건을 고려하여, 그의 발생 가능성에 대한 평가를 실시하고, 그에 따른 적절한 방재대책을 수립할 때 인명 및 재산의 피해를 최소화시킬 수 있다.

산사태의 발생 위험성에 대한 연구방향은 먼저 발생 가능성이 있는 지역을 평가하고, 그 지역의 발생 가능성의 정도를 분석하는 연구로 구분되어 국내외적으로 다양한 각도에서 진행되어 오고 있다. 대표적으로 GIS를 이용한 방법, 인자중첩법(Factor Overlay Method), 그리고 통계론적인 방법(Statistical Method)등의 연구가 진행되어 왔다. 이러한 연구는 지형공간 정보를 활용하는 분야와 임학분야, 지반공학분야에서 각각 이루어져 왔으며,

2006년 8월 11일 접수, 2006년 9월 15일 채택

* 정회원·(주)지완테크 이사 (geo-group@hanmail.net)

최근에는 이를 통합하여 좀 더 체계적으로 산사태의 발생가능성을 분석하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 이러한 연구의 일환으로 지형공간정보 자료를 활용하여 사면의 경사 및 토층현황 등을 분석하고, 이를 지반공학적인 견지에서 무한사면 안정해석법에 적용하여, 산사태의 안전율을 평가할 수 있는 해석방법에 대해 연구하였다. 특히, 광역적인 지역에 대한 안정성 분석을 위해 확률론적 해석이론을 도입하여, 사면 경사나 토층 깊이에 대한 지형적인 정보와 흙의 내부마찰각과 점착력 등의 전단강도정수 및 단위중량, 지하수위 등의 인자들을 확률변수로 적용하여 신뢰도 분석을 수행하였다.

2. 산사태 분석방법에 대한 이론적 고찰

기존의 산사태 관련된 자료는 산사태 이력, 산사태 발생지역에 대한 현황도 및 항공사진 등으로 관리하면서, 발생 이후의 피해복구에만 노력을 기울여 왔다. 산사태를 미연에 방지하고, 산사태에 의한 피해를 최소화하기 위해서는 산사태 발생 가능지역에 대한 예측이 필요하며, 이러한 예측을 위해서는 광범위한 지역의 관련정보의 처리와 분석이 요구된다. 이때에 GIS를 이용하여 지형공간에 대한 수치적 정보를 활용하면 다양한 관점에서의 분석이 가능하고, 이를 관리하는데 있어도 매우 효율적이라 할 수 있다.

이와 같은 GIS를 이용하여 산사태의 발생에 대해 분석한 방법에는 항공사진분석 및 지상측량, 산사태 위험도 작성등의 직접적인 방법에 의해 접근하는 산사태 발생분포 분석(Landslide Inventory Analysis)과 전문지식의 지형학자들에 의해 결정된 경중률을 반영하여 지형분석 및 정성적 지도결합의 방법으로 접근하는 경험적 분석(Heuristic Analysis)이 있다. 또한, 과거 사면붕괴가 발생한 지역을 분석하여 영향인자를 선정하고 이를 이변량 또는 다변량 통계분석 방법등으로 분석하는 통계적 분석(Statistical Analysis)이 있으며, 물리학적 평형법칙으로부터 유도된 사면안정 해석모델을 적용하여 안정성에 대한 양적인 계산을 수행할 수 있는 결정론적 분석(Deterministic Analysis)방법이 있다(천기선, 2005).

여기서, 결정론적 분석방법을 이용하면 지반공학적 사면안정성 해석과 연계함으로써 현재 설계 및 시공에 직접적으로 적용하고 있는 사면 안정성평가의 지표인 안전율(Factor of Safety)을 구할 수 있다. 지반공학 분야에서 산사태에 대한 해석은 일반적으로 무한히 긴사면에서의 외력과 저항력의 한계평형식으로부터 유도된 무한사면 해석법(Infinite Slope Stability)이 적용되고 있다.

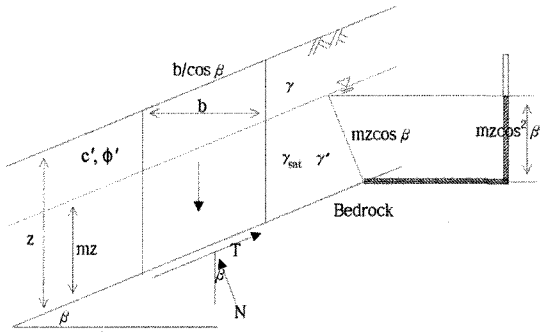


그림 1. 무한사면 해석법의 힘의 평형

일반적인 무한사면의 활동은 그림 1과 같이, 지하수위면이 파괴면 위로 mz되는 깊이에 있고, 사면에 평행한 방향으로 정상침투가 일어난다고 가정한다. 이러한 가정을 바탕으로 구한 무한사면의 안전율을 다음 식 (1)에 나타내었다.

$$F_S = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + [\{(1-m)\gamma + m\gamma'\} \cdot z \cdot \cos^2\beta]\tan\phi'}{\{(1-m)\gamma + m\gamma_{sat}\} z \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta} \quad (1)$$

여기서, c는 흙의 점착력, m은 토층심도에 대한 포화된 토층심도의 비, γ, γ′, γ_{sat}는 각각 흙의 습윤, 수중, 포화 단위중량을, z는 수직한 흙의 깊이, β는 사면의 경사, 그리고 ϕ'는 흙의 유효 내부마찰각이다.

최근에는 그림 1과 같은 무한사면 해석법에 실제 지형의 수목이나 식생의 뿌리에 의한 강도 증가를 감안 이를 겉보기 점착력, Δc_r로 고려하여 식 (1)의 분자항에 c′을 c′+Δc_r로 대체하여 적용하기도 한다.

3. 확률론적 해석방법

산사태 분석방법에 대한 이론적 고찰에서 살펴본 바와 같이 결정론적 방법에 의한 산사태 가능성 분석은 지반공학적 사면안정 해석과 연계하여 정량적 평가가 가능한 방법이다. 이러한 결정론적 방법에 의한 사면안정의 한계평형해석에 있어서는 일정한 값을 갖는 입력변수들에 의해 해석되어 하나의 안전율을 분석하는 방법이 일반적으로 사용된다.

그러나 입력되는 토질의 특성치와 사면의 파괴모델의 한계 등으로 인하여 사면안정 해석에 있어 불확실적인 요소는 항상 존재하게 된다. 더욱이 본 연구와 같이 광역적인 지형정보 자료에 의한 분석에서는 사면안정 해석을 위해 Format을 맞추기 위한 변환이 필요하며, 이 때 오차가 발생할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 불확실성

과 입력치의 분산성을 합리적으로 고려하기 위해 신뢰성 해석에 근간을 둔 확률론적 방법(Probabilistic Approach)을 도입하였다.

확률론적 접근법은 산사태 발생 위험 평가에 관계되는 주요한 인자들에 대하여 불확실성을 고려할 수 있도록 이를 일정한 확률분포(Probability Distribution)를 갖는 확률변수로 가정하고, 확률변수로부터 사면의 안정해석을 반복수행하여 그 결과를 평균 안전율 또는 파괴확률로 분석하는 방법이다.

3.1 확률변수

흙의 특성을 나타내는 각종 물성치들의 통계적 특성은 Lumb(1966), Wu & Kraft(1967), Oka & Wu(1990) 등에 의해 많은 연구가 이루어졌다. 이들의 연구결과에 의하면 각종 강도정수들의 확률분포는 정규분포나 대수정규분포하고 있는 것으로 알려져 있다. 이진후(1990)는 사면파괴에 대한 확률론적 연구를 통해 사면안정 해석에서 흙의 강도정수 c와 ø의 확률분포 형태는 정규분포나 대수나선분포 및 베타분포에 관계없이 거의 동일한 사면안전율을 보이는 수치해석 결과를 제시하였다.

본 연구에서는 확률론적 사면안정 해석에 필요한 흙의 점착력, 내부마찰각, 흙의 단위중량, 투수계수와 더불어 지형정보인 표고자료와 토층심도, 그리고 식생 뿌리에 의한 강도 등의 제반 인자의 확률분포를 식 (2)와 같은 정규분포로 가정하여 해석을 실시하였다.

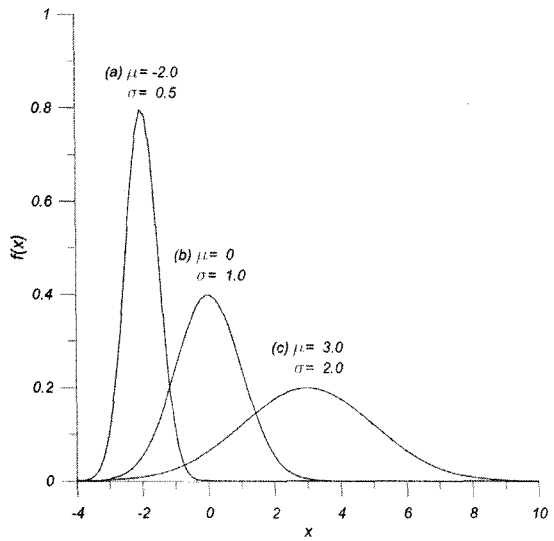


그림 2. 정규분포곡선

$$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{(2\pi)}}\,e^{-\frac{1}{2}\left|\frac{x-\mu}{\sigma}\right|^2} \tag{2}$$

여기서, x는 확률변수, μ는 평균, 그리고 σ는 분산을 의미한다.

그림 2는 평균과 표준편차에 따른 정규분포의 특성을 나타낸 그림이다. 각종 입력자료 그림 2와 같이 정규분포하는 난수(Random Number)를 발생시켜 사면 안정해석을 하게 되며, 본 연구에서는 난수를 발생시키는 방법으로 간단하면서도 적절한 신뢰성을 가지는 Monte Carlo Simulation(Greco, 1996)을 이용했다. Monte Carlo Simulation은 복잡한 적분이나 Taylor 급수를 푸는 과정, 그리고 하나 이상의 확률변수의 확률분포를 계산하는데 가정 적합한 방법으로 알려져 있다. 이렇게 발생된 난수는 Box-Muller Method(William 등, 1992)에 의해 정규분포의 확률변수로 입력된다.

3.2 확률론적 안정성 평가방법

확률론적 방법에서의 사면안정해석은 결정론적 방법에 의한 안전율(Factor of Safety, F_S)이외에 안정계수를 좀 더 정량적인 수치로 표현할 수 있는 파괴확률(Probability of Failure, PF)의 개념으로 사면의 안정성을 나타내게 된다. 이인모(1991)는 파괴확률의 개념을 Safety Margin과 Safety Factor 두 가지로 나타내었다. Safety Margin은 신뢰도 함수(Reliability Function)로서 이 값이 0보다 작을 때 파괴로 본다. 이때의 파괴확률, P_f는 다음의 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$P_F=P(M<0)=\int_{-\infty}^{0} f_M(M)\,dM \tag{3}$$

여기서, P_F는 파괴확률, M은 Safety Margin, $f_M(M)$은 Safety Margin의 확률밀도함수이다.

Safety Factor에서 안전율, F_S는 저항을 하중으로 나눈 값으로 정의되며, 이 경우에는 안전율이 1보다 작으면 파괴상태이다. 그러므로 파괴확률은 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_F=P(F_S<1)=\int_{0}^{1} f_{F_S}(F_S)\,dF_S \tag{4}$$

여기서, f_{Fs}는 Safety Factor의 확률밀도함수이다.

확률론적 해석에 있어서 Safety Margin이나 Safety Factor는 하중항과 저항항을 항상 포함하기 때문에 이들 항에 대한 도수분포를 알아야 한다. 그러나 이들 항을 자세히 살펴보면 이들 두 항이 모두 흙의 전단강도, 단위중량, 수압 등의 요소로 구성된다고 할 수 있다. 따라서, 이러한

세부요소들의 분포로부터 하중과 저항의 분포를 구하게 되며, 이로부터 M과 FS의 분포를 구할 수 있다. 하지만 각 요소들의 정확한 분포를 알 수 없을 뿐만 아니라 각 요소의 분포를 조합하는 것이 거의 불가능하다. 그러므로 실제로 각 요소들을 확률변수(Random Variable)로 나타내어 일정 구간내에서 그 값이 무작위로 변화한다고 본다. 이를 통계적인 변수인 평균값(Mean)과 표준편차(Standard Deviation)와, 표준편차를 평균값으로 정규화한 변동계수(Coefficient of Variation)를 사용하여 나타낸다. 이러한 각 요소들의 분포특성으로부터 M 또는 F_S의 확률밀도함수를 구하게 된다.

본 논문에서는 파괴확률을 위의 식 (3)과 (4) 가운데 Safety Factor에 의한 개념으로 식 (4)로 분석하였다. 그리고 확률변수를 적용하여 구한 N개의 안전율 중에서 그 값이 1이하로 나타나는 개수를 M으로 하여, 사면의 파괴확률, P_F를 다음 식 (5)와 같이 정의하였다(이진후, 1990).

$$P_F = \frac{M}{N} \tag{5}$$

4. 지형공간 정보와 이를 활용한 해석프로그램

광역적인 지역에 있어 산사태의 확률론적 평가를 위해서는 3차원적인 지형정보를 그림 1과 같은 무한사면 해석법에 적용할 수 있도록 1차원 단면형상으로 변환해야 한다. 이러한 변환에 지형공간 정보를 이용하게 된다. GIS를 이용한 변환과정에서의 오차를 완전히 배제할 수는 없으나 GIS를 이용한 분석은 많은 양의 자료 처리가 가능하고, 응용하기가 매우 편리할 뿐 아니라 지형모델을 이용하여 사면의 각종 지리정보 분석에 적합한 자료를 쉽게 얻을 수 있으므로 그 활용성이 우수하다 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 지형공간 정보를 격자구조(Grid Network)의 수치고도(Digital Elevation)자료로 변환하여 적용하였다. 격자구조의 수치고도자료는 구조가 간단하고, 취급하기 쉬운 장점이 있으나, 임의의 셀에서 사면내의 물의 흐름방향과 흐름의 누적면적을 계산할 때, 본 연구에 적용에 있어 인접해 있는 한 셀에서부터 흐름이 오게 된다는 가정으로 인해 오차가 발생하는 등의 문제점 또한 내포하고 있다.

수치고도자료로부터 각 격자의 평균높이와 경사, 물의 흐름방향 및 흐름의 양과 누적면적 등을 산정하는 방법으로 Zevenbergen & thorne(1985)이 제안한 다음의 과정을 적용하였다.

하나의 셀을 둘러싸고 있는 3×3의 행렬은 9개의 변수로 구성된 식 (6)의 다항식으로 제시할 수 있다.

$$Z = AX^2Y^2 + BX^2Y + CXY^2 + DX^2 + EY^2 + FXY + GX + HY + I \tag{6}$$

식 (6)의 A~I의 매개변수들은 3×3행렬이 가지고 있는 9개의 표고로부터 Lagrange다항식을 이용해 구할 수 있다. 이렇게 구한 사면의 경사는 다음과 같다.

$$\alpha = dZ/dS = G\cos\theta + H\cos\theta \tag{7}$$

여기서, S는 임의의 방향 θ에서의 수평길이이다.

식 (7)은 3×3행렬의 가운데 점에 대한 경사이므로 이 점에서의 $\cos\theta = -G/(G^2+H^2)^{1/2}$, $\sin\theta = -H/(G^2+H^2)^{1/2}$이 된다. 이를 정리해 보면 경사는 다음과 같다.

$$\alpha = -(G^2+H^2)^{1/2} \tag{8}$$

음의 부호는 아래로 향하는 θ의 방향을 나타내고, 일반적으로 무시하여 사용하게 된다. 사면의 최대 경사방향은 다음과 같이 θ에 대하여 미분하여 구할 수 있다.

$$d\alpha/d\theta = -G\sin\theta + H\cos\theta = 0 \tag{9}$$

이를 정리하여 식 (10)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{max} = ASPECT = \tan^{-1}(-H/-G) \tag{10}$$

이러한 과정을 Zevenbergen & Thorne(1985)는 Fortran 컴퓨터 언어를 사용한 프로그램으로 개발하였고, 본 연구에서는 이를 부프로그램(Subroutine Program)으로 적용하여 수치지형모델을 분석하였다.

격자구조의 셀 크기는 입력자료의 신뢰성에 상당한 영향을 주기 때문에 신중하게 고려되어야 할 사항 중 하나이다. 수치표고모델에서 적합한 셀 크기를 결정하는 방법들은 대부분 지형자료만이 고려된다. 하지만 각종 토질정수나 토층심도등도 불확실성과 공간적인 분산성을 가지고 있으므로 이러한 사항 역시 셀 크기를 결정하는데 중요한 요소임이 분명하다.

지형적인 정보에 의해 셀 크기를 결정할 때, 가장 적합한 셀 크기는 그 자료의 정확성이나 그 지형의 복잡성등에 의해 좌우된다. 어느 정도까지의 작은 셀 크기는 그 지형을 자세히 나타낼 수 있으나, 그 이상 작은 셀 크기는 지형을 올바르게 나타내지는 못하게 된다. 예를 들어, 표고자료의 오차가 1m라 했을 때, 1m의 셀 크기에 의해 계산된 경사나 흐름방향등은 그 신뢰성이 매우 적을 것이다. 반면에 10m의 셀 크기에 의한 경사나 흐름방향은 이 값들은 충분한 정확성을 가질 것이다. 물론 복잡한 지형에서 완만한 지형에 비해 조밀한 셀 크기가 필요로 하게 된다.

무한사면의 파괴역학은 파괴 토체의 길이가 그 깊이 보다 충분히 길다는 가정 하에 있다. 이 가정에 의해 셀 크기의 최소값은 제한 받게 된다. 즉, 격자구조의 입력자료에서 격자 셀 크기는 평균 토층심도보다 일반적으로 6~8배 정도로 될 것을 추천한다(Chandler, 1992). 셀 크기가 이와 같이 제한될 때, 각각의 셀이 무한사면 파괴활동에 대해 독립적으로 평가될 수 있다.

Zevenbergen and Thorne(1987)은 위와 같은 여러 사항을 고려하여 셀 크기를 결정한 결과, 가장 적합한 셀 크기로 4.5m를 제안하였고, Chandler(1992)는 약 5~15m 정도를 공학적으로 적정한 범위라고 평가했다.

본 연구에서는 이러한 지형정보 활용방법을 적용하여 3차원적인 지형을 일정한 간격의 격자로 나눠 각 격자에 대한 산사태 발생 가능성을 안전율과 파괴확률의 개념으로 평가하는 해석모델을 구축하였다. 이와 같이 구축된 해석모델을 실제의 지형에 적용하여 그 타당성을 검토하였다.

5. 산사태 해석의 적용

5.1 개요

우리나라는 매년 적지 않은 수의 산사태가 발생하여 상당한 피해를 주고 있지만, 활동이 일어난 사면의 적절한 신뢰성을 갖는 자료는 극히 부족한 실정이다(백영식 등, 1990). 본 연구에서도 해석모델의 타당성 검증을 위해 사면활동이 발생한 지역에 대해 고찰하려 하였으나, 이러한 지역의 분석을 위해 요구되는 신뢰성있는 자료를 획득하기가 쉽지 않은 상황이다. 따라서, 비교적 사면에 대한 정보가 체계적으로 조사되어 있는 지역을 선정하여 해석모델의 적용성을 검증하였다. 선정된 지역은 강원도 횡성군에 위치한 위락시설개발사업지구(환경영향평가보고서, 1993)이다.

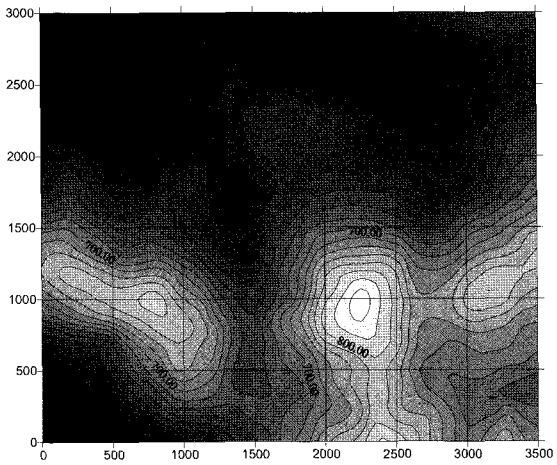
5.2 대상지역의 해석적용

대상지역에 대한 해석은 수행의 경제성 및 결과의 신뢰성 향상을 위하여 먼저, 전체구간에 대해 비교적 큰 격자와 기존자료로부터 산정된 입력정수로부터 해석을 실시하여 산사태 발생의 전반적인 경향 파악 및 산사태 가능성이 높은 구간에 대한 상세 검토구간을 선정하였다. 이후, 선정된 상세 검토구간에 대해 크기가 작은 격자와 지반조사 등을 통하여 획득한 설계정수를 적용하여 보다 정확도가 높은 산사태 가능성을 분석하는 순으로 진행하여 보다 합리적인 해석과정이 되도록 하였다.

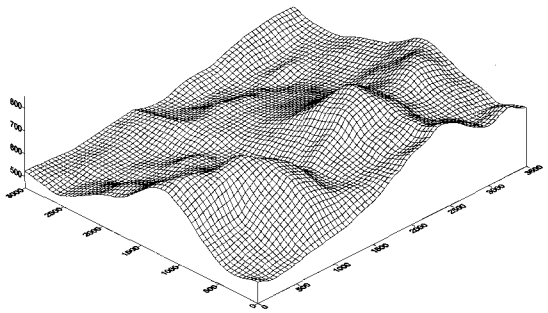
5.2.1 전체구간에 대한 해석

전체구간에 대한 해석을 위하여 그림 3과 같이 사업지구가 포함되어 있는 가로 3,500m, 세로 3,000m의 지역에 대한 표고지형정보를 구축하였다. 표고지형정보의 구축은 1:25,000지형도를 Vectorizing하여 수치화 한 후, 상용프로그램인 ESRI사의 Arc/Info 프로그램을 이용하고, 격자 셀은 크기가 50m인 격자망 구조로 형성하였다. 그림 3은 공간좌표와 고도 자료를 이용하여 격자구조로부터 상용프로그램인 Golden Software의 SURFER프로그램을 이용하여 Kriging공간 보간법으로 (a)지표면 등고선 및 (b)굴곡을 나타낸 그림이다.

사업지구의 전체적인 해석은 50m셀 크기를 갖는 표고지형자료로 격자구조를 형성하고, 토층심도는 대략 1m 전후의 두께로 형성되어 있다고 가정하였다. 또한, 흙의 점착력, 내부마찰각, 포화단위중량, 투수계수 등은 사업지구의 토질구성에 참조할 수 있는 기존문헌을 검토하여 값을 선정하고, 변동계수는 Harr(1977)의 제안값을 사용하였다. 이와 같이 프로그램에 필요한 요소에 대한 대략적인 자료는 산사태 발생 가능성을 정확하게 분석하는데



(a) 등고선도



(b) 3차원 수치표고 모형

그림 3. 대상지역의 전체 지형

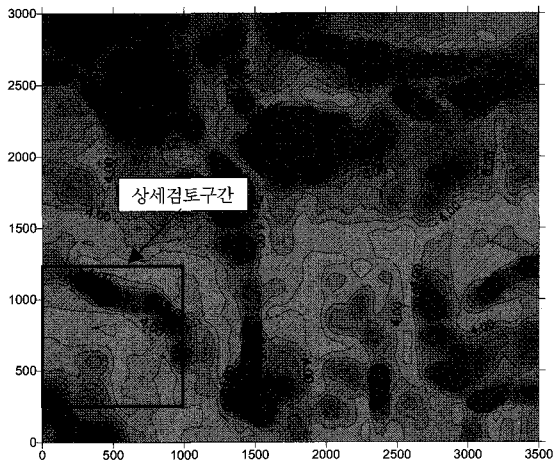
표 1. 전체사업지구의 예비해석을 위한 입력자료

Number of Grid Cell (row×column)	70 × 60	
Grid Cell Size	50m	
Number of Trial	1000	
Elevation Coefficient of Variation	1.0	
Soil Depth Coefficient of Variation	0.2	
Vegatation Species	Fir	
Root, T_R	400 kg/cm^2	
TR of Coefficient of Variation	0.53	
Root Area Ratio	0.001	
COV of Root Area Ratio	1.128	
24-hour precipitation (mm/day) - Recurrence Interval (years)	234.6	10.0
	283.3	20.0
	313.5	30.0
	353.6	50.0
	392.8	80.0
	412.4	100
Soil Parameter	Mean	COV
Cohesion (kg/cm^2)	0	0.40
Friction Angle (degree)	24.2	0.10
Saturated Unit Weight (kg/cm^3)	1.95	0.10
Hydraulic Conductivity (cm/sec)	1.13E-3	0.20

는 그 결과값의 오차가 다소 클 수 있으나, 넓은 지역에 대한 예비해석 단계의 산사태 분석방법으로는 큰 제약은 없다고 판단된다. 표 1은 사업지구 전체의 산사태 분석을 위한 입력자료이다.

위와 같은 조건으로 사업지구에 대한 전반적인 산사태 발생 가능성을 확률론적 방법을 이용하여 정량적으로 분석한 결과를 그림 4(a)의 등평균 파괴확률선도와 그림 4(b)의 등평균 안전율선도로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전반적으로 안전율이 2.0이상, 파괴확률은 0.3 이하의 비교적 산사태의 발생가능성이 적은 것으로 분석되었다. 다만 종축과 횡축이 각각 0~1,500m의 구간에서 전체 사업지구에 비하여 비교적 높은 파괴확률과 평균 안전율이 나타나 본 사업지구 가운데 사면 파괴의 가능성이 가장 크게 분석되었다. 또한, 산봉우리가 포함되어 있어 상류흐름에 의해 지하수위가 누적되는 현상을 잘 나타낼 수 있으며, 산봉우리 아래로 급경사가 형성되어 있어 상세검토구간으로 해석모델을 적용하기에 적합한 지역으로 판단되었다. 이렇게 선택된 상세검토구간 그림 4(a)와 (b)에 나타내었다.

(a) 등평균 파괴확률선도



(b) 등평균 안전율선도

그림 4. 사업지구 전체의 산사태 위험선도

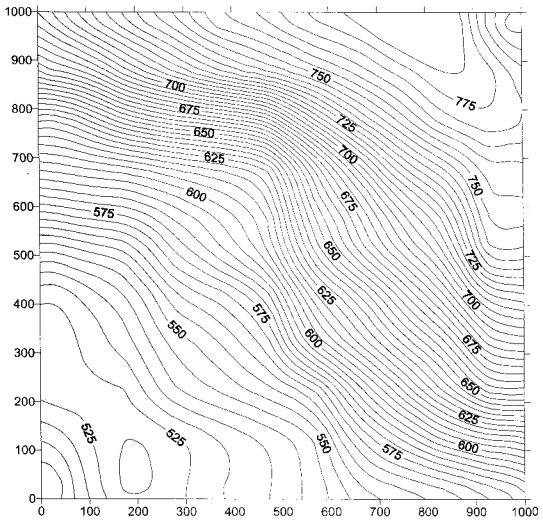
5.2.2 상세검토구간에 대한 해석 적용

선정된 상세 검토구간에 대한 3차원 수치표고모형은 10m의 격자크기로 고려하였으며, 그림 5의 (a)지형의 등고선 및 (b)사면형상으로 나타내었다. 이 사면에 대한 여러 입력자료들 가운데 토질정수는 현장에서 측정한 결과(환경영향평가보고서, 1993)를 사용하였으며, 표 2에 그 결과를 정리하였다.

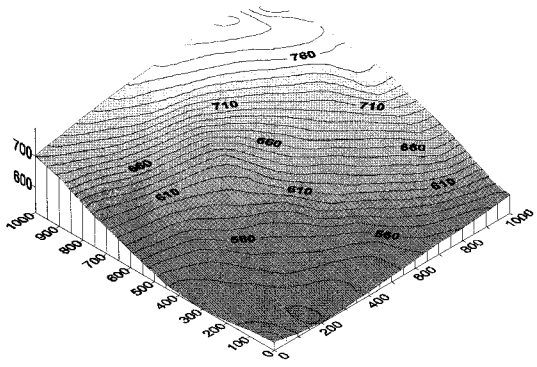
위와 같은 검토조건으로 산사태의 발생 가능성을 분석한 결과, 평균 안전율이 1이하로 나타나는 격자의 수가 845로 나타나 전체 격자수 10,000(=100×100)에 비하여 8.5%가 파괴가능성이 있는 것으로 나타났다. 전체 사면에 대한 각 셀 안전율의 평균값은 7.144로 나타나 대상지역이 전반적으로 안전한 것으로 분석되었다.

표 2. 상세검토를 위한 토질정수

Specific Gravity		2.65
Liquid Limit	(%)	37.0
Plastic Limit	(%)	9.4
Saturated Unit Weight	(kg/cm^3)	2.09
USCS		SM
Cohesion	(kg/cm^2)	0.023
Friction Angle	(degree)	26.6
Hydraulic Conductivity	(cm/sec)	8.34E-4



(a) 등고선도



(b) 3차원 수치표고 모형

그림 5. 상세검토구간의 수치표고 모델

각 셀에 대한 평균 파괴확률은 최저값 0, 최고값 0.28이고, 평균값 0.085로 나타났다. 그림 6은 이러한 파괴확률의 분포를 등평균 파괴확률선도로 나타낸 그림이다. 그

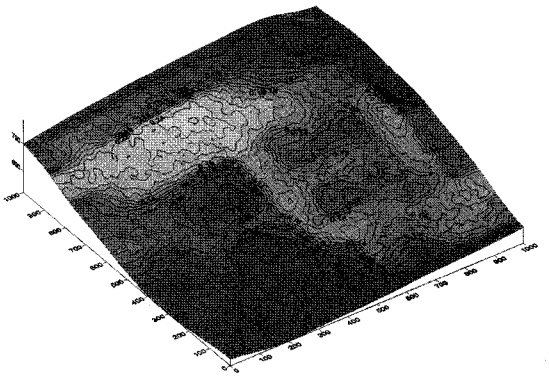


그림 6. 상세검토구간의 파괴확률분포

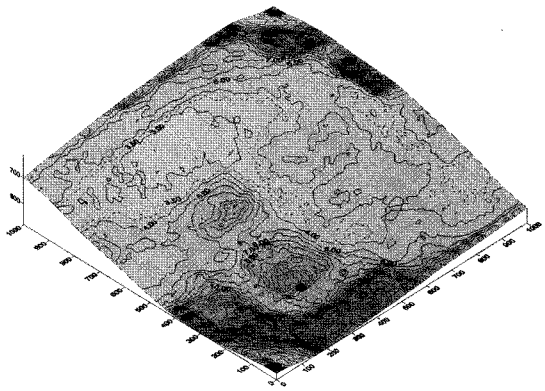


그림 7. 상세검토구간의 안전율분포

림에서 보듯이 횡축의 0~400m, 종축의 0~400m의 지역은 낮은 파괴확률로 분포되어 있고, 횡축의 400~550m, 종축의 750~850m의 지역은 비교적 높은 파괴확률로 형성되어 있다. 가장 높은 파괴확률은 Cell(48,86)에서 0.28로 나타났는데, 이 셀은 그림 6에서 가장 밝은 부분으로 나타나 있는 횡축의 400~550m, 종축의 750~850m지역에 포함되어 이 연구지역이 산사태 발생가능성이 가장 높은 지역이로 분석되었다.

각 셀의 평균 안전율은 2.27에서 47.46까지 나타났으며, 그림 7은 안전율의 분포를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 대부분의 지역이 5이상의 높은 안전율로 형성되어 있으며, 횡축의 250m~550m, 종축의 700m~850m에서 안전율이 3이하로 비교적 낮게 나타나있다. 가장 낮은 안전율을 갖는 셀 역시 파괴확률과 마찬가지로 Cell(48,86)에서 나타났는데, 2.27의 안전율을 보이고 있어, 이 셀을 중심으로 부근의 지역이 연구대상 지역 중 가장 큰 파괴 가능성을 보인다. 하지만, Cell(48,86)이 평균 파괴확률 0.28, 평균 안전율 2.27로 연구대상지역 가

운데 가장 낮은 파괴 성향을 나타내고 있지만, 실제로 파괴가 발생될 만한 파괴성향은 아니라고 판단된다.

이와 같이 지형공간 정보를 활용한 산사태 안정해석의 확률론적 해석 모델을 실제 현장에 적용한 결과, 대상구간의 전체적인 산사태 가능성을 평가할 수 있었으며, 상세 검토구간의 파괴확률과 안전율 등의 정량적인 산사태의 안정지표를 획득할 수 있었다

6. 결 론

본 연구는 지형공간 정보를 활용한 산사태의 발생 가능성 평가에 있어, 정량적인 안정지표의 산정이 가능한 한계평형해석을 적용한 결정론적 방법에 불확실성을 고려할 수 있는 신뢰성 개념을 도입하여 확률론적 해석모델로 산사태 가능성을 분석하였고, 그 결과를 아래와 같이 도출하였다.

1. 본 연구에서는 지형공간 정보를 활용하여 넓은 지역의 산사태 발생가능성을 힘의 평형으로 유도된 무한사면 안정해석모델로 분석하여 정량적인 안전지표로 평가할 수 있었다. 또한, 해석모델에 입력인자의 불확실성을 고려할 수 있는 확률변수 개념을 도입하여 신뢰성 이론에 근거를 둔 산사태의 확률론적 분석법을 연구하였다.

2. 광역적인 지역에서의 산사태 발생 가능성을 안전율이나 파괴확률 등의 안정지표로 나타내기 위해서는 많은 양의 지형자료 처리가 필요하다. 이를 위해 GIS를 활용하여 수치고도자료를 획득하고 이를 이용하여 산사태 발생 가능성을 정량적으로 평가할 수 있는 지형모델을 구축할 수 있었다.

3. 본 연구의 산사태 발생 가능성 해석모델의 적용성을 평가하기 위하여 실제 지형정보 등을 획득하고, 전구간에 대한 개략적 평가를 위한 전체해석과 세밀한 결과 도출을 위한 상세해석을 실시하였다. 전체해석에서는 대상구간의 전반적인 산사태 발생 가능성 경향을 분석하고, 상대적으로 산사태 가능성이 높은 상세해석 구간을 선정하였다. 또한, 상세해석에서는 보다 높은 정도를 산사태 발생 가능성을 안전율과 파괴확률의 안정지표로 분석할 수 있었으며, 파괴 가능성이 가장 높은 국부적인 위치를 분석할 수 있었다.

참고문헌

1. 백영식, 김일헌, 김기웅, 양우식, 1990, "사례 분석에 의한 사면해석의 비교 연구", *한국토질공학회지*, 제 6권, 2호, pp. 47-54.
2. 성우종합레저산업(주), 1993, *성우고원리조트 개발사업 환경영향평가 보고서*, 성우종합레저 산업주식회사.
3. 이인모, 1991, "사면안정(X)", *한국지반공학회지*, 제 7권, 1호, pp. 86-92.
4. 이인모, 1991, "뿌리의 강도가 자연사면 안정에 미치는 영향에 관한 실험연구", *한국토질공학회지*, 제 7권, 2호, pp. 51-66.
5. 이진후, 1990, *이차원 사면파괴에 관한 확률론적 연구*, 공학석사 학위논문, 인하대학교 대학원.
6. 천기선, 2005, *GIS를 이용한 산사태 취약지 결정 기법*, 공학박사 학위논문, 강원대학교 대학원.
7. Chandler, D. S., 1992, "An Area Approach to Forest Slope Stability", Doctor of Philosophy, University of Washington.
8. Greco, V. R., 1996, "Efficient Monte Carlo Technique for Location Critical Slip Surface", *J. of Geotech. Eng. Div.*, ASCE, Vol. 122, No. 7, pp. 517-525.
9. Harr, M. E., 1977, Mechanics of Particulate Media, McGraw-Hill.
10. Lumb, P., 1996, "The Variability of Natural Soils", *Can. Geotech. J.*, 3, No. 2, May, pp. 74-97.
11. Oka, Y. and Wu, T. H., 1990, "System Reliability of Slope Stability", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 8, pp. 1185-1189.
12. William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery, 1992, "Numerical Recipes in Fortran : The Art of Scientific Computing", Cambridge University Press.
13. Zevenbergen, L. W., and Thorn, C. R., 1985, "Fortran Computer Program TOPO", Dept. of Geography and Earth Science, Queen Mary College (University of London), London, U. K., April 15.
14. Zevenbergen, L. W., and Thorn, C. R., 1987, "Quantitative Analysis of Land Surface Topography", Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 12, pp. 47-56.