

<2004년 2월 서울대학교 박사학위 논문>

# 다중셀과 지형지수를 이용한 광역 산사태 위험지 예측



차 경 섭

서울대학교 농업기반건설공학 연구실

## 1. 머리말

우리나라 대부분의 산지지형은 가파르며, 기반암을 덮고 있는 표토층의 두께가 비교적 얇다. 그리고, 연평균 강우량은 1,300mm~1,500mm정도이며, 대부분 7, 8월 사이에 집중되고 있다. 이러한 지질 및 기후 등의 자연조건과 급증하는 산지개발로 우리나라에서는 매년 유사한 형태의 산사태가 반복되며 이로 인하여 많은 인명, 재산피해가 속출하고 있다.

산사태는 전원공간의 대부분을 차지하는 산지자체의 파괴를 가져올 뿐 아니라, 인명피해, 토양유실, 교량 및 도로의 파괴, 농지 및 농업수리시설의 파괴, 그리고 가옥 및 문화재의 손실 등 2차, 3차 피해를 유발시키는 가장 큰 자연재해 중 하나이다. 최근에는 도시의 팽창으로 전원공간에 대한 개발이 증대되고 있는데, 지반공학적, 수문학적으로 불안정하거나 안정성이 낮은 지역에 대한 개발로 인하여 더 많은 인명 및 재산피해가 우려되고 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 18명의 인명손실과 재산손실을 초래하였다.

산사태의 발생에는 자연적 요인과 인위적 요인 등 다양한 요인들이 복합적으로 연관되어 있어 정량적인 예측이 어렵기 때문에, 지금까지의 산지재해에 대한 대책은 예방보다 복구에 초점이 맞추어져 있는 실정이다. 그러나, 산사태에 대한 과학적인 분석을 통해 사전에 산사태 위험지역을 미리 예측하고, 관측함으로써 이에 대한 적절한 대책을 세운다면 산사태로 인한 피해를 많이 줄일 수 있을 것이다.

산사태에 대한 연구는 초기에는 개별사면에 대한 안정성을 평가하는 연구가 주로 진행되어 왔으나, 산사태는 넓은 범위에 걸쳐 동시다발적으로 발생하므로, 발생가능성에 대한 광역적 예측이 필요하다.

본고에서는 사면안정해석모형과 수문모형을 지리정보시스템에서 결합한 역학적 기법에 의한 산사태 위험지 예측기법에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 산사태 분석

### 가. 산사태 유발요인

산사태 발생요인은 크게 내적요인과 외적요인으로 구분할 수 있으며, 내적요인은 지질, 지형, 토질, 암상 등 간접 요인이며, 외적원인은 직접 원인으로서 강우, 침식, 지진, 절성토, 벌목 등으로 구분된다(Bromhead, 1992). 우리나라의 경우 대부분의 산사태는 여름철 집중호우 및 태풍에 의하여 발생되므로 강우가 대표적인 외적원인이다. 그럼 1처럼 강우가 발생하면, 지중침투수에 의한 간극수압의 상승, 표면유수에 의한 침식, 흙의 포화로 인한 활동토층의 단위중량 증가 등에 의해 사면을 붕괴시키려는 활동력은 증가되고 사면붕괴에 저항하려는 저항력은 감소되어 사면의 안정성이 저하된다(Fredlund, 1981). 강우인자로는 강우강도, 강우지속시간, 누적강우량 등이 있는데, 선행강우에 의한 누적강우량은 그 양의 많고 적음을 떠나 침투조건에 영향을 끼치며, 강우강도와 지속시간 등은 사면파괴에 직접적인 영향을 준다(Terlien, 1996).

반면, 내적요인은 그 자체로서 산사태를 유발하는 것이 아니라

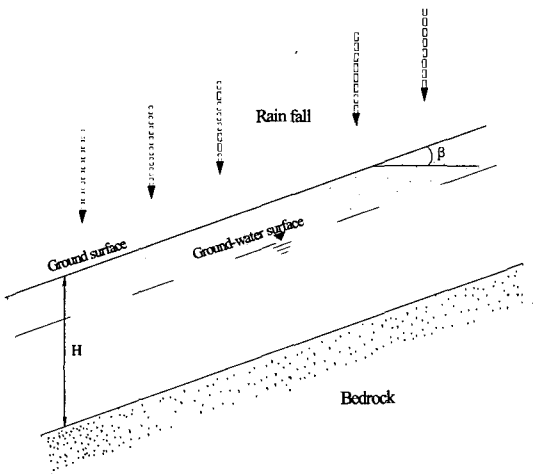


그림 1 Landslide mechanism

다른 요인과 결합하여 사면의 불안정을 야기시킨다.

지형인자는 표고, 사면경사, 향, 곡률, 굴곡 등으로 구성되는데, 사면경사는 경사면상에서 물질의 추진력에 크게 영향을 미친다. 지형(굴곡)은 지표수 및 지하수의 집중, 분산, 이동에 크게 영향을 주기 때문에 산사태 발생과 깊은 관계가 있다. 실제로도 산사태는 오목사면(하강사면), 볼록사면(상승사면)에서 다수 발생하고 있다. 토질인자는 점착력, 내부마찰각, 단위중량, 밀도, 투수성 등이 있으며, 강도가 약하거나 함수율이 클수록 산사태가 일어나기 쉽다. 자연사면에서 식생은 뿌리와 식생상부의 하중에 의해 사면안정성에 영향을 끼친다. 일반적으로 흙과 뿌리의 상호 마찰력과 인발력에 의하여 강도가 증가되며, 식생상부는 식생자체의 하중 및 풍하중, 설하중 등으로 사면을 불안정하게 만든다.

나. 산사태 예측

산사태 발생가능성을 예측하는 방법은 통계적인 방법과 물리법칙에 근거한 역학적 방법이 있다. 통계적 기법은 산사태 발생지와 각종 환경·지질·토질 인자들과의 상관관계에 의하여 발생가능성을 추정하는 기법이며, 산사태 발생위치, 지형, 토양, 임상, 지질, 수문 등 산사태와 관련된 요소들을 GIS를 이용하여 데이터베이스로 구축하고, 각 요인의 등급 및 가중치를 정한 후 통계적 기법으로 산사태 발생 취약성을 분석한다. 통계적 기법은 1:25,000 ~ 1:50,000의 중축척 지도를 이용하여, 넓은 지역에 대한 개략적인 위험성을 평가한다.

반면, 역학적 방법은 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 방

법이다. 역학적 기법은 1:5,000의 대축척 지도를 이용하여, 보다 좁은 지역에 대한 정밀한 예측을 추구한다. 통계적 기법이 연구지역의 타지역에 대한 적용성이 떨어지고, 많은 데이터가 축적되어야 산사태와 유발인자간의 관계를 결정지을 수 있다는 단점이 있는 반면에 역학적 기법은 물리법칙에 근거하므로, 다른 곳에 적용할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 물리법칙에 근거한 역학적 기법에 의하여 산사태를 예측하는 기법을 개발하고, 위험지를 예측하고자 한다.

3. 산사태 위험지 예측 모형

역학적 기법에 의한 산사태 위험지를 예측하기 위해서는 사면안정성을 평가하는 GIS 데이터베이스를 바탕으로 사면안정해석모형, 식생모형, 수리/수문모형 등이 유기적으로 결합되어야 한다(그림 2). 본 연구에서는 사면안정해석모형은 무한사면안정해석모형을 개선한 수정된 사면안정해석모형을 개발하였고, 수문모형은 지하수위 모형을 이용하였다.

가. 개선된 사면안정해석모형

무한사면해석법은 활동면의 형태를 사면 표면에 평행한 직선으로 가정한 계산법으로 활동면의 길이가 활동면의 깊이에 비하여 충분히 긴 산지사면의 안정계산에 사용한다. 흙의 성질과 지하수 조건은 전체 사면에 걸쳐 변하지 않는 것으로 가정하고, 지표면까지 침투수가 있을 때 가장 위험하다. 그런데, 광역적으로 산사태를 평가하기 위해서는 지리정보시스템을 이용하여 셀단위 해석을 수행하게 되는데, 무한사면안정해석모형은 지형인자 중에서 경사도만을 인자로 취급하므로, 사면의 모양을 평탄한 사면으로만 해석하게 된다. 그러나, 실제 파괴된 사면의 형상은

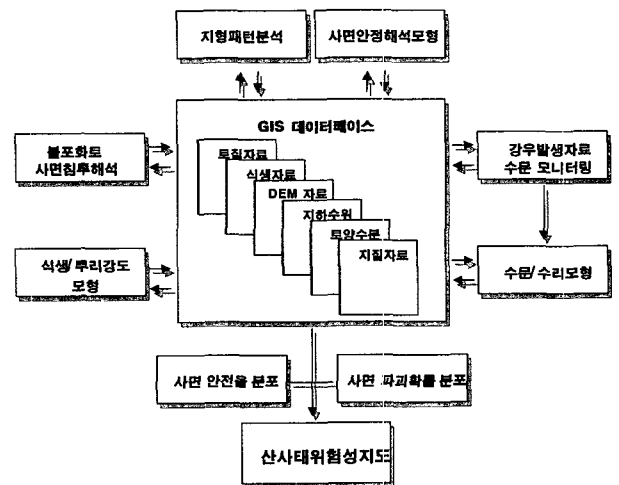


그림 2 Flow chart of prediction of potential landslide sites

평탄사면뿐 아니라 오목사면, 볼록사면, 복합사면 등 다양한 사면에서 파괴가 발생하고 있으므로, 실제사면의 형상이 안전율에 미치는 영향을 규명하기 위해서는 개개의 셀단위로 평탄사면 해석을 수행하기 보다는 사면의 형상을 고려할 수 있도록 다중셀에 기반한 사면안정해석이 필요하다. 그림 3에서 임의의 한 개의 셀은 경사방향으로 상부셀과 하부셀로 연결된다. 본 연구에서는 이렇게 연결되는 2개 이상의 셀을 다중셀로 정의한다. 그림 3에서 Z<sub>7</sub>셀에 대해서 다중셀이 경사방향의 상부로는 Z<sub>3</sub>이고 하부로는 Z<sub>11</sub>이므로, Z<sub>3</sub>-Z<sub>7</sub>-Z<sub>11</sub>은 3개의 셀로 이루어진 하나의 셀단위가 된다. 이러한 다중셀에서는 경사도뿐만 아니라 지형의 굴곡이 반영이 되므로, 개개 셀단위의 해석에 비해 실제사면에 대한 사면 안전율에 근접한 결과를 얻게 된다. 2개의 셀로 이루어진 사면을 그림 4에 나타내었다.

1차원 사면안정모형인 무한사면안정해석모형에서는 사면의 경사는 고려할 수 있으나, 사면형상은 반영할 수 없기 때문에 사면안전율이 실제와는 다르게 산정된다. 반면, 2차원 사면안정해석모형은 지형조건을 모두 고려할 수 있으므로, 실제의 안전율을 산정할 수 있으나, 많은 반복계산이 필요하고, 격자로부터 해당 사면의 셀을 추출하여 안전율을 산정하는 것이 쉽지 않기 때문에

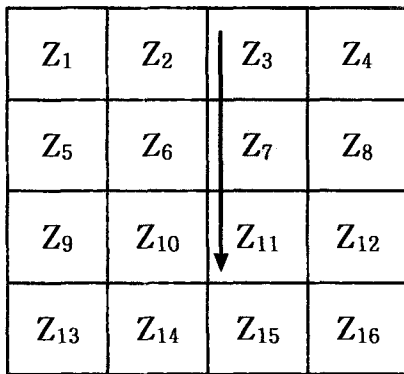


그림 3 Grid and cell in DEM

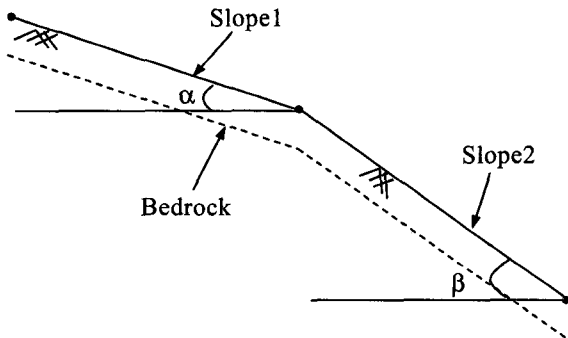


그림 4 Slope schema composed of slope1 and slope2(2 cells)

지리정보시스템 내에서 이 모형을 이용하기란 매우 어렵다. 그러므로, 본 연구에서는 1차원 사면안정모형을 이용하면서 사면형상을 고려할 수 있도록 하기 위하여 지형지수(Landform index, LI)를 정의하고, 이를 이용하여 사면안정해석을 수행하였다. 자연사면은 평탄사면 뿐 아니라 오목, 볼록 그리고, 복합사면이 존재한다. 2개의 셀로 이루어진 임의의 사면을 가정하였을 때, 평균경사도가 동일한 평탄사면의 안전율에 대한 굴곡이 있는 사면의 안전율의 비는 1보다 작게 된다. 굴곡의 변화에 대한 안전율비를 도표로 나타내면 직선식이 나타난다. 이때 굴곡의 변화량에 따른 평탄사면 대 비평탄사면의 안전율의 비를 지형지수라고 정의할 수 있으며, 이 관계식은 식(1)과 같다.

$$LI = - \frac{\Delta FS(\text{Flexion})/FS(\text{Flat})}{\Delta ABS(\tan \alpha - \tan \beta)} \quad (1)$$

여기서, LI는 지형지수이고, FS(Flexion)는 굴곡이 있는 자연사면의 안전율이며, FS(Flat)은 평탄사면의 안전율이고,  $ABS(\tan \alpha - \tan \beta)$ 은 굴곡량의 절대값이다.

그러므로, 수정된 사면모형에서는 다중셀 사면의 경사도로부터 지형지수를 산정하고, 무한사면해석결과와 결합하여 지형을 고려한 사면안전율을 산정한다.

나. 수문모형

본 연구에서는 분포형 수문모형을 이용하여 강우에 의한 토층 내 포화깊이를 예측하고, 이를 이용하여 사면안정해석모형으로부터 사면안정성을 평가하였다. 각각의 셀에 연속방정식의 1차원적 형태를 적용한다. 그림 5에서 정상상태 지표하 유출량과 유입량이 같다고 하면 아래와 같이 지하수위를 구할 수 있다.

$$D_w = \frac{zRA}{bT \sin \theta} \quad (2)$$

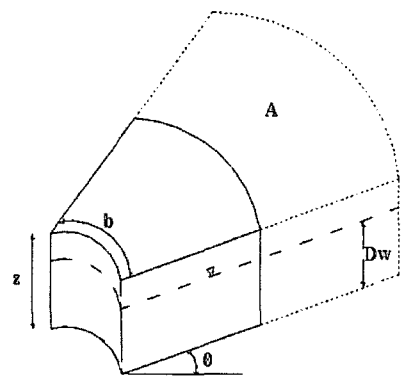


그림 5 Definition of specific catchment area

#### 4. 광역산사태 위험지 예측

경기도 양주군 장흥 지역을 대상으로 구축된 자료를 가지고, 수문모형과 지형지수를 도입한 2차원 사면안정해석 모형을 지리정보시스템 내에서 결합하여 역학적 기법에 의한 광역적 산사태 위험성도를 작성하고 위험지를 예측하였다. 사용한 수치지도는 1:5,000 축척이며, 토질인자는 토심, 점착력, 내부마찰각, 투수계수, 습윤단위중량, 포화단위중량을 사용하였고, 지형인자로는 경사도와 굴곡을 사용하였으며, 수문인자로는 지하수위를 사용하였다. 수치지형도로부터 경사도를 추출하여 다중셀 사면의 경사와 굴곡을 산정하고, 이로부터 지형지수를 산정하여 토질 및 수문인자와 함께 사면안정해석모형에 적용하여 자연사면에 대한 안전율을 산정하였다.

먼저, 실제 파괴된 사면에 적용하여, 지형지수를 도입한 광역 산사태 평가기법의 적용가능성을 살펴보았다. 위험한 사면의 영역을 발생된 산사태 영역과 비교하여 본 결과, 기존 무한사면안정해석을 이용한 예측결과보다 지형지수를 이용한 예측결과 10%정도의 예측향상을 나타내었고, 통계적 기법과 비교해서 20%이상 향상된 결과를 나타내었다.

다음으로, 강우강도 및 지속시간에 의한 지하수위 변화에 따른 산사태 위험성의 변화를 살펴보았다. 강우에 의하여 지하수위가 상승함에 따라, 점차 안전율이 낮아지며, 습윤지수 0.4이상에서 최초로 위험지역이 나타났고, 지하수위 상승에 따라 점차 확대되었다.

마지막으로, 셀단위로 산사태 위험지를 예측하는 것에서 나아가 지리정보시스템에서 자동으로 사면 및 소유역을 추출하여 사면별, 소유역별로 광역적인 위험성을 평가하였다. 그 결과, 지역별로 지질, 토질, 수문특성에 따른 위험지를 비교·예측할 수 있었다.

#### 5. 맺음말

본 연구에서는 여름철 집중호우시 많이 발생하는 산사태에 대한 예방대책 수립에 활용하기 위하여 사면안정모형과 수문모형을 지리정보시스템에 결합한 광역 산사태 위험지 예측 기법을 개발하였고, 경기도 장흥지역에서 발생한 산사태에 대하여 개발된 산사태 예측기법의 적용성을 검증하였다. 먼저, 사면의 굴곡을

표현하기 위하여 셀과 셀을 결합한 다중셀을 정의하였다. 그리고, 지형지수를 평탄사면에 대한 비평탄사면의 안전율의 비로 정의하고 사면안정해석에 도입하였으며, 지형지수를 평균경사도의 함수로 나타내었다. 기존 무한사면안정해석을 이용한 예측결과보다 지형지수를 이용한 예측결과 10%정도의 예측향상을 나타내었고, 통계적 기법과 비교해서 20%이상 향상된 결과를 나타내었다. 유역내 사면에 대하여 사면별, 유역별 안전율 지도를 작성하였고, 위험사면 및 위험지역을 예측하였다.

추후, 산지유역에 대하여 강우에 따른 침투현상 및 지하수 흐름현상 등을 파악할 수 있다면, 보다 합리적인 예측이 가능할 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

1. Pack, R. T., Tarboton, D. G., and Goodwin, C. N., 1998, The SINMAP approach to terrain stability mapping, 8th congress of the international association of engineering geology, Vancouver, British Columbia, Canada 21-25 September
2. Park, S. J., McSweeney, K. and Lowery, B. 2001. Identification of the spatial distribution of soils using a process-based terrain characterization, *Geoderma* 103, pp.249~272
3. Sivakumar Babu, G. L., and Mukesh, M. D., 2002, *Landslide analysis in Geographic information systems*, Map India, pp
4. Terlien, M. T. J., 1996, Modelling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides. Ph. D. thesis, ITC Publ. Nr. 32, The Netherlands, 254
5. Wu, T. H., and Abdel-Latif, M. A., 2000, Prediction and mapping of landslide hazard, *Canadian Geotechnical Journal* Vol. 37, pp.781~795
6. 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
7. Zhou, C. H., Lee, C. F., Li, J., and Xu, Z. W., 2002, On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong, *Geomorphology* 43, pp.197-207