

연구논문

공간 예측 모델을 이용한 산사태 재해의 인명 위험평가

장동호* · C.F.Chung**

공주대학교 지리학과*, 캐나다지질조사소**
(2006년 7월 24일 접수, 2006년 12월 18일 승인)

Life Risk Assessment of Landslide Disaster using Spatial Prediction Model

Dong-Ho Jang* · C.F.Chung**

Department of Geography, Kongju National University*, Geological Survey of Canada**
(Manuscript received 24 July 2006; accepted 18 December 2006)

Abstract

The spatial mapping of risk is very useful data in planning for disaster preparedness. This research presents a methodology for making the landslide life risk map in the Boeun area which had considerable landslide damage following heavy rain in August, 1998. We have developed a three-stage procedure in spatial data analysis not only to estimate the probability of the occurrence of the natural hazardous events but also to evaluate the uncertainty of the estimators of that probability. The three-stage procedure consists of: (i) construction of a hazard prediction map of "future" hazardous events; (ii) validation of prediction results and estimation of the probability of occurrence for each predicted hazard level; and (iii) generation of risk maps with the introduction of human life factors representing assumed or established vulnerability levels by combining the prediction map in the first stage and the estimated probabilities in the second stage with human life data. The significance of the landslide susceptibility map was evaluated by computing a prediction rate curve. It is used that the Bayesian prediction model and the case study results (the landslide susceptibility map and prediction rate curve) can be prepared for prevention of future landslide life risk map. Data from the Bayesian model-based landslide susceptibility map and prediction ratio curves were used together with human life data to draft future landslide life risk maps. Results reveal that individual pixels had low risks, but the total risk death toll was estimated at 3.14 people. In particular, the dangerous areas involving an estimated 1/100 people were shown to have the highest risk among all research-target areas. Three people were killed in this area when landslides occurred in 1998. Thus, this risk map can deliver factual damage situation prediction to policy decision-makers, and subsequently can be used as useful data in preventing disasters. In particular, drafting of maps on landslide risk in

various steps will enable one to forecast the occurrence of disasters.

Key words : landslide, life risk map, susceptibility map, prediction rate curve, disaster preparedness

1. 서 론

우리나라는 매년 각종 자연재해로 인하여 수백 명의 인명과 수 천 억원의 재산피해를 입고 있다. 자연재해는 자연의 큰 힘과 지역사회의 내력이 불균형적으로 접하고 있는 지역에서 발생한다. 방재에 근거한 자연력, 예를 들면 태풍이나 지진 등의 파괴력은 과거에도 발생되었고 미래에도 발생할 것이다. 이러한 자연의 힘에 대항하여 인류는 여러 가지 지식을 동원하여 대처하였다. 자연재해에 대한 인간의 대처사업은 토목사업으로 취급하여 예로부터 국가의 가장 큰 사업의 하나로 여겨왔다. 즉 토목사업을 통하여 자연재해로부터 주민의 생명과 재산을 보호하기 위한 치산, 치수, 해안보전 등 국토보전을 실시하였다(국립방재연구소, 2001).

그러나 우리나라는 자연재해가 발생했을 때 인명피해와 재산피해를 최소화하기 위한 노력에도 불구하고 수년간 대형 재해재난이 발생했을 때 피해 규모가 확대되고 있는 실정이다(국립방재연구소, 2001). 또한, 최근 자연재해에 대한 관심과 국민들의 정보욕구가 증대되고 있고, 기상이변으로 인한 자연재해가 대형·다양화 되고 있는 추세여서 재해 예방, 상황관리, 응급대책 및 복구 등 재해관련 각종 업무를 신속·정확하게 처리하기 위한 원격탐사 및 GIS 기법을 이용한 자연재해관리가 미흡하여 이에 대한 개선 대책이 시급하다.

우리나라는 여름철 집중호우로 인한 산사태로 매년 막대한 피해를 입고 있다. 따라서 산사태의 과학적인 분석을 통해 발생원인을 분석하고 이를 근거로 산사태 발생 가능성 및 위험성을 평가하고, 예측하기 위한 산사태 위험성 평가기법이 개발되어야 한다. 현재 국내 및 국외에서는 이러한 산사태 분석기법이 많이 개발되고 있으며, 최근에는 원격탐사 및 GIS를 이용하여 방대한 자료를 체계적으로 처리하고 있다(류주형 외, 2002). 즉, 산사태 연구와 관련

하여 많은 관련 정보의 효율적인 분석이 가능한 GIS와 산사태 발생 지역의 탐지 및 정보추출에 유용한 원격탐사는 그 적용가능성이 큰 분야이다.

산사태에 관한 국내 연구는 크게 산사태 발생지역 조사를 통한 산사태 발생요인을 규명하려는 연구와 규명된 산사태 발생인자를 통한 산사태 예측에 중점을 둔 연구 등이 있다. 산사태 발생지역에 대한 조사는 주로 산사태 발생요인의 특성을 규명하는데 중점을 둔 연구들이다(최경, 1986; 마호섭, 1994; 김명국, 1997; 신영수, 1999). 이들은 산사태 발생인자로 모암, 사면의 횡단면, 사면길이, 경사도, 사면위치, 임분경급, 토심, 종단면형, 강우, 곡차수 등을 제시하였다.

최근 들어서는 GIS를 이용한 산사태 취약성 연구가 최근 활발하게 진행되고 있으며, 산사태 관련 공간정보 자료의 DB 구축이 이루어지고 있다. 신은선(1996), 이사로(1999) 등은 특정 지역을 대상으로 GIS기법을 적용한 산사태 분석 연구를 수행하였다. 또한, 이사로 외(2001), Park *et al.*(2003), 장동호 외(2004), 박노욱 외(2004, 2005) 등은 원격 탐사 및 GIS기법을 이용한 산사태 예측 기법을 연구하였다. 이들 연구는 주로 일정 지역을 대상으로 GIS 분석 기법을 적용함으로써 산사태 취약성 분석에 적절한 GIS 기법을 개발하는데 초점을 맞추고 있다.

외국의 경우, 산사태 연구는 국민의 재산과 인명피해를 최소화하기 위해 국가사업으로서 장기적 프로그램에 의해 막대한 예산을 투입해서 체계적인 연구를 수행하고 있다. 미국은 미국지질조사소(USGS)를 주관기관으로 국가산사태 재해프로그램(National Landslide Hazard Program; NLHP)을 수행하고 있으며, 특히, USGS 내 국립산사태정보센터(NLIC)에서 '지질재해 평가(Geologic Hazard Assessment)' 프로그램을 수행하여 산사태 취약성 평가 및 산사태 발생 가능지역 지도 작성 연구를 수

행하고 있다. 이를 통하여 산사태 발생 가능지역을 상시 감시하고 산사태에 대한 조기 경보 체제를 구축하였다. 캐나다는 지질조사소(GSC)에서는 산사태 연구를 국가지질재해 프로그램의 일부로서 수행하고 있다. 산사태 발생예측 연구에서는 정량적 산사태 예측을 위한 산사태 발생 모델을 개발하고, 지질공학, 원격탐사, GIS, 통계학을 종합하여 확률론적 산사태 가능성을 연구하며, 이를 통해 시·공간적 산사태 발생확률을 예측하고 있다(한국지질자원연구원, 2003).

이밖에 산사태 연구는 현지조사를 통해 산사태 발생인자 등을 선정하였고(Varnes, 1984; Brand, 1985; Wakens and Koirala, 1986), Chung and Fabbri(1993, 1998)는 조건부 확률, Certainty Factor, 퍼지 연산 등의 예측 모델을 이용하여 다양한 지역에 대한 정량적인 산사태 예측도 작성을 시도하였다. 또한 예측 결과의 타당성 검증을 위하여 시간적으로 구분되는 두 그룹의 산사태 발생 위치를 이용하여 여러 가지 확률적인 예측 모델들을 정량적으로 비교하였다(Chung and Fabbri, 1999).

이상의 국내외에서 수행된 산사태 재해 연구는 주로 산사태 조사기술, 산사태 발생가능도 작성, 산사태 발생 예측도 작성, 산사태 위험도 평가, 마지막으로 실시간 산사태 모니터링 기술 등이다. 특히, 대부분의 산사태 연구들은 산사태 발생 가능도 및 예측도 작성이 주를 이루고 있다. 다만 일부 외국에서 산사태 위험도를 평가한 예가 있지만(Komac, 2004; Bell and Glade, 2004; Liguori and Mortellaro, 2004; Fabbri, *et al.*, 2004) 국내에서는 아직까지는 전무한 실정이다.

일반적으로 산사태 평가는 취약성(susceptibility), 가능성(possibility), 위험성(risk)을 평가한다. 산사태 취약성은 강우, 지진 등 산사태를 직접적으로 유발시키는 요인이 생겼을 때 그 지역이 얼마나 산사태 발생에 취약한가를 평가하는 것이고, 산사태 가능성은 어떤 지역의 산사태 취약성에 강우, 지진 등 산사태 유발요인의 발생 가능성을 더해 그 지역에서 산사태가 얼마나 잘 일어날 수 있는가를 평가한 것

이다. 여기서 이러한 산사태 유발요인을 가정한 후 산사태 가능성을 예측할 수 있다. 그리고 산사태 위험성은 산사태 취약성 혹은 가능성에 의해 인명 및 시설물의 경제적 손실을 평가하는 기술로서, 산사태 발생예측기술을 토대로 하여 사태물질의 이동경로·확산범위 예측기술이 확립되어야만 종합적으로 수행할 수 있는 연구이다(Einstein, 1988).

따라서 본 연구에서는 산사태 취약성 및 예측도를 이용하여 인명손실과 관련된 산사태 위험도(landslide risk map)를 작성하는 방법론을 제안하고자 한다. 즉, 미래의 산사태 발생에 의한 인명손실을 추정하기 위해 3단계의 공간데이터 분석 방법을 제안하여 산사태 인명 위험도를 작성하였다.

II. 연구 지역 및 연구 자료

1. 연구 지역

연구 대상지역은 행정구역상 충청북도 보은군 보은읍과 수한면, 탄부면 지역으로, 지리적 좌표는 동경 $127^{\circ}39'33.82'' \sim 127^{\circ}44'57.86''$, 북위 $36^{\circ}26'02.32'' \sim 36^{\circ}29'58.48''$ 에 위치한다(Fig. 1).

보은군은 충청북도 남부 내륙에 위치하며, 지형적으로는 소백산맥과 노령산맥으로 둘러싸여 침식 분지의 형태를 띠고 있다. 지질은 서쪽부터 황강리

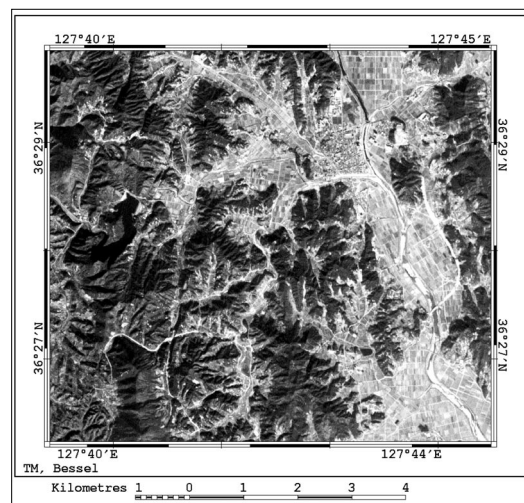


Fig. 1. Location map of the study area (IRS-1C)

퇴적층, 흑운모화강암, 죽전리운모화강암의 순서로 분포하며, 특히 죽전리 운모화강암 지역에서는 1998년에 대규모 산사태가 발생하였다(장동호 외, 2004). 연평균 기온은 10.5°C이며, 1월 평균기온은 -4.2°C, 8월 평균기온은 24.0°C 내외로 연교차는 28.2°C이다(보은군, 2004).

본 지역은 1998년 8월 11~12일 양일간의 집중호우로 44개의 산사태가 발생하였다. 특히 이 시기의 집중호우로 인하여 인명피해가 3명 발생하였으며, 수많은 가옥이 완파되고 도로, 비닐하우스, 경지 등이 유실되어 약 50억 원의 재산피해가 발생하였다(보은군, 1999).

2. 연구 자료

산사태 위험도 분석을 위한 지형자료는 1:25,000 도폭의 수치지형도를 이용하여 수치표고모델(DEM)을 작성하였고, 이로부터 사면경사도와 사면방위도를 작성하였다. 또한 산사태 발생과 관련이 있는 다른 주제도들은 1:25,000 정밀토양도(토양배수), 1:50,000 임상도(수목) 및 1:50,000 지질도를 사용하였다. 사용된 공간자료의 공간 해상도는 5m × 5m이며, 총 1,624 × 1,444 화소의 GIS 데이터베이스로 구축하였다.

산사태 발생위치는 산사태 발생 전후의 위성사진 및 항공사진 분석을 통해 일차적으로 획득하였고, 현장조사를 통해 산사태 발생위치를 표시하였다. 이러한 과정으로 표시되어진 산사태는 주로 지형적인 특성과 인위적인 절개면을 따라 발생하였다. 발생위치는 1999년 이전에 총 420개의 산사태가 발생하였으며, 특히, 1998년에는 44개의 산사태가 발생하였다(Fig. 2). 탐지된 산사태 위치 중에서 유동에 의한 피해 지역은 산사태 발생에 대한 정보를 제공하지 않으므로 제거하였다. 따라서 본 연구에서는 1998년 산사태를 포함하여 총 420개의 산사태 발생지역을 공간 데이터베이스로 구축하였으며, 이중 산사태 취약성 분석에 210개, 검증에 210개를 사용하였다. 1998년 44개의 산사태는 실제로 연구지역에 44개의 산사태가 발생한다면 인명피해가 얼마나 발생할

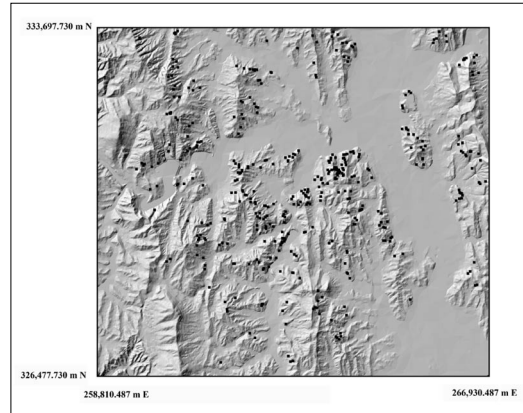


Fig. 2. Landslide scar distribution over a shaded relief map in the study area

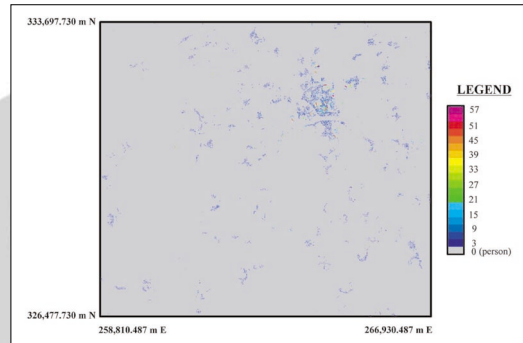


Fig. 3. Population distribution of the study area

지를 분석·검증하기 위해 사용하였다.

본 연구에서는 인명과 관련된 산사태 위험도를 작성하기 위해 현지조사를 실시하였다. 특히 산사태 취약성이 90%이상 되는 지역의 가구는 직접 방문하여 인구수를 조사하였으며, 나머지 지역은 보은군 전체 인구수와 전체 건물면적을 평균하여 각 건물면적당 인구수를 산정하여 지도화하였다(Fig. 3).

III. 산사태 위험성 분석 방법론

최근 들어 자연재해 연구는 재해의 위험 평가 기술과 기존에 작성된 공간모델과의 통합을 통해 공간예측(spatial prediction)의 일반화를 시도하고 있다. 특히 자연재해 중 산사태, 홍수, 지반침하, 토양침식 등의 발생 또는 재발생의 가능성을 공간적·통계적으로 예측하고 있다.

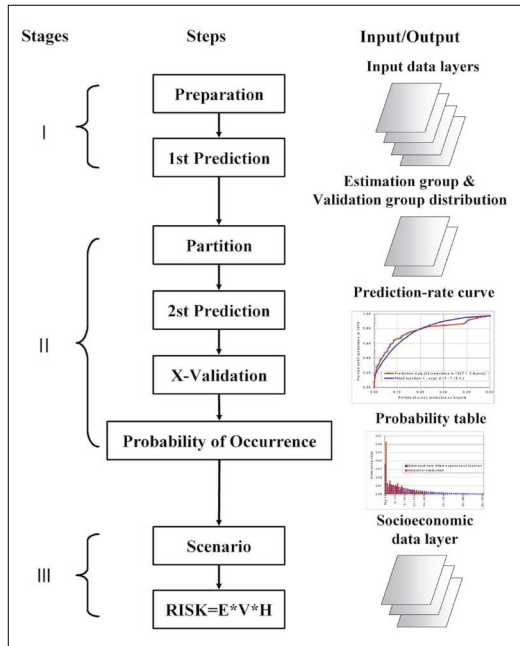


Fig. 4. Flow diagram of the approach proposed for spatial predictive modeling of hazard and risk

따라서 본 연구는 미래의 산사태 발생에 의한 인명손실을 추정하기 위해 3단계의 공간데이터 분석(Fabbri *et al.*, 2004) 방법을 사용하여 산사태 위험도를 작성하였다. 이러한 연구는 재해 발생 확률을 예측하기 위함일 뿐만 아니라 확률 평가의 불확실성 역시 평가하기 위한 것이다. 3단계 과정은 다음과 같이 구성된다. (i) 미래 재해의 위험 예측 지도 구성, (ii) 예측 결과의 타당성/신뢰성 및 예측되는 위험 수준 각각의 발생 확률의 평가, (iii) 첫 번째 과정에서의 예측 지도와 두 번째 과정에서 예측된 확률을 인구 자료와 결합하여, 가정 혹은 확립된 위험 수준을 나타내는 인구요인이 도입된 위험 지도의 작성이다. Fig. 4는 3단계 과정에 이용된 접근 방법의 흐름도를 나타내고 있다.

1. 위험 예측: 단계 I

위험 예측의 최초 단계(단계 I)는 주제도 작성 및 DB화를 통한 산사태 취약성 (landslide susceptibility)을 분석하는 것이다. 주제도는 크게 3개 영역으로 나눌 수 있는데, 즉 (a) 산사태 발생과

관련된 자연적인 범주형 주제 자료 층(지질도, 토지 피복/이용도, 식생도, 토양도 등), (b) 지형경관을 특징짓는 연속형 자료 층(DEM으로부터 획득된 고도분포도, 사면경사도, 사면방위도), 그리고 (c) 과거 여러 시기에 발생한 다양한 유형의 재해 분포와 형태를 보여주는 산사태 발생 위치도를 작성하는 것이다.

자료의 준비에 있어서는 동일한 해상도, 좌표계 통합(geo-referencing) 및 정합(co-registration), 주제도 통합을 위한 지도 단위 경계영상의 추출, 개별 산사태 발생 위치를 인식할 수 있도록 하는 고유 라벨 지정이 요구된다. 주제도는 필요에 따라 산사태 발생 지역의 적절한 구획 인식, 그리고 산사태 발생을 시간 순서로 분할한 산사태 발생지도(산사태 발생지역을 대표할 수 있는 최초 발생지역), 또한 이어지는 단계 II에서 이루어질 산사태 취약성 실험 및 검증에 위한 공간 서브셋 혹은 무작위 그룹이 요구된다.

자료 준비 이후의 1차 예측 단계는 모든 범주형 자료와 연속형 자료, 그리고 같은 형태로 작성된 산사태 재해 발생 자료를 이용하여 수학적 통계모델 (Weight of Evidence, Fuzzy Sets, Logistic regression, Empirical Likelihood Ratio; Certainty factor; Chung and Fabbri, 1993, 1998, 2003)들 중 적절한 예측 모델을 선정하는 것이다(박노옥 외, 2003). 본 연구에서는 산사태 발생과 관련이 있는 여러 공간자료의 확률론적 표현을 위해 우도비함수(likelihood ratio) 기반의 베이지안 예측모델(Bayesian Prediction Model)을 이용하여 산사태 취약성 분포도를 작성하였다.

베이지안 확률 이론은 적용 대상을 확률론적으로 표현하고, 단일 자료뿐만 아니라 산사태 예측과 같은 여러 자료를 함께 분석에 사용할 수 있다(Duda *et al.*, 1976). 베이지안 이론에서는 일반적으로 초기 확률(a priori probability), 조건부 확률(conditional probability), 사후 확률(a posteriori probability) 등으로 표현이 되는데, 본 연구에서는 조건부 확률의 비로 정의되는 우도비를 적용하였다. 우도비는 $[0, \infty]$ 의 값을 가지게 되는데, 우도비가 1

보다 클수록 그 속성에서 특정 사건의 발생 가능성이 높음을 의미하며, 1보다 작을수록 발생 가능성이 낮은 것을 의미한다.

2. 검증: 단계 II

두 번째 단계(II)는 미래의 산사태 발생 확률(probability)을 추정하는 것이다. 이를 위해서는 각 모델의 예측능력을 정량적으로 비교하기 위한 일종의 교차검증이 필요하다. 본 연구에서는 과거 산사태 지점을 분할하여 계산하는 교차검증에 기반을 둔 예측비율곡선을 작성하여 검증하였다. 예측 비율곡선은 과거 산사태의 분할에 기반으로 계산하는데, 일반적으로 검증을 위한 분할은 크게 3가지 방법이 있다. 즉, 먼저 시간 순서에 따른 분할, 다음으로 연구지역 일부의 공간적 서브 세트(예를 들어 상하 혹은 좌우)로 분할, 마지막으로 재해 발생의 무작위 50% 서브 세트 분할 등이 있다. 본 연구에서는 마지막 방법인 무작위 서브세트 분할 방법을 사용하였으며, 교차검증을 위해 총 420개 산사태 발생위치 중 210개는 산사태 취약성 분포도 작성에 사용하고, 나머지 210개는 검증에 사용하였다. 그리고 반대로 검증에 사용된 자료를 산사태 취약성 분포도 작성 자료로, 산사태 취약성 분포도 작성 자료를 검증용 자료로 사용하였다. 이러한 방법으로 정규화된 예측비율을 얻게 되고, 각 취약성 등급별 산사태 발생 확소수를 계산하여 누적합수 형태인 예측비율곡선을 작성할 수 있다(Chung and Fabbri, 1999; 박노옥 외, 2005).

교차검증은 단계 I에서처럼 계수화된 각각의 예측 항목(class)에 포함되는 유효 산사태 발생 횟수 및 크기를 측정하여 이루어진다. 즉, 교차검증 결과는 공간 비교를 통해 예측의 효율성을 나타내는 예측비율 표 또는 예측비율곡선을 만들어낸다. 단계 I에서의 1차 예측과 마찬가지로 2차 예측 역시 영상으로 나타낼 수 있으나 이는 예측비율 표 만큼 많은 정보를 전달되지는 않는다. 특히, 교차 검증 결과가 예측을 해석하는데 있어 편리하지만, 예측 영상이 정확하지 않은 경우가 종종 발생 할 수 있다. 예를

들어 높은 예측치에서 정확한 산사태 발생의 집중도가 좋지 않을 수 있다. 따라서 이러한 경우, 입력 주제도들을 변경하면서(주제도의 수를 늘리거나 줄여서, 혹은 주제도 세트나 조합을 달리해서) 단계 I을 여러 번 반복하는 것이 바람직하다.

이상의 결과로 2차 예측 지도가 정확해지면, 특정 시나리오에 의해 산사태 발생 확률 표를 작성할 수 있다. 즉, 산사태 발생 예측 비율 표는 시간상 산사태 발생 분포에 있어 일정 정도의 시간적 유사성 가정에 기초한 자료로 산사태 발생 확률 표로 변환할 수 있다.

3. 위험 평가: 단계 III

위험 평가(단계 III)는 미래의 동일한 혹은 유사한 기간, 최초 시간 간격 동안의 산사태 발생 분포에 기초한 시나리오를 필요로 한다. 특히, 시나리오는 산사태 발생 강도의 증가 또는 감소 경향에 따라 수정 및 적용이 가능하여야 한다. 시나리오는 평균 차원에 대한 입력 값 및 미래에 예상되는 산사태 발생 수를 제공한다. 예측된 위험 등급 내에서의 미래 산사태 분포는 단계 II에서 얻어진 산사태 발생 확률 표로 나타낸다.

위험도 평가를 위한 사회·경제적 주제도들은 지금까지 위험 예측에 사용된 데이터베이스와 동일한 해상도 및 정합을 갖는 디지털 영상으로 작성한다. 대표적인 산사태 위험도는 인명과 관련된 위험도, 시설물과 관련된 위험도, 산림피해와 관련된 위험도 등이 있다. 본 연구에서는 인명과 관련된 산사태 위험도를 작성하기 위해 인구분포도를 주제도로 선정하였고, 단위 면적 혹은 길이 당 취약성을 계산하였다. 인구분포도의 취약성은 기존 데이터베이스와 동일한 공간적 해상도로서 표시되어야 하며, 확률 값은 인명손실이 전혀 없을 때 0과 인명손실이 있을 때의 값 1 사이로 주어진다.

이상의 3단계 결과 자료를 가지고 최종적으로 산사태 위험도를 작성할 수 있다. 즉, (1) 사회경제적 자료층(인구취약도), (2) 단계 I에서 미리 작성된 일차 산사태 취약성 분포도, (3) 과정 II에서 각각의 영

역 해상도 단위와 각각의 화소에 대한 확률 표를 이용하여 산사태 인명 위험도를 작성하였다. 획득된 산사태 인명 위험도도는 식 1의 방법으로 획득할 수 있었다. 여기서, E는 인명손실과 관련된 위험인자, V는 산사태 취약성, 그리고 H는 위험성(미래의 산사태 발생가능성)을 나타낸다.

$$RISK = E * V * H \quad (1)$$

산사태 위험도 작성에 사용된 공간 모델링 소프트웨어는 캐나다 SpatialModels 사의 Spatial Prediction Analysis Models (Spatial Prediction Model, Spatial Risk Analysis)이다.

IV. 산사태 위험성 모델의 적용

1. 산사태 취약성 분석

위험도의 공간적 지도화는 재난 대비 계획에 있어 반드시 필요한 자료이다. 본 연구에서는 산사태 빈도가 높은 연구지역에서의 적용을 예를 들어 위험 예측과 재난 관리 사이의 바람직한 관계를 보여주고자 한다.

본 연구에서는 위험 예측의 최초 단계인 산사태 취약성을 분석하기 위해 산사태 발생과 관련된 범주형 및 연속형 자료와 과거 발생한 산사태 발생 위치도를 이용하여 산사태 취약성 분포도를 작성하였다.

Fig. 5는 범주형 자료와 연속형 자료의 우도비식을 이용하여 통합한 보은지역의 산사태 취약성 분포도이다. 연구결과, 보은지역의 산사태 취약성이

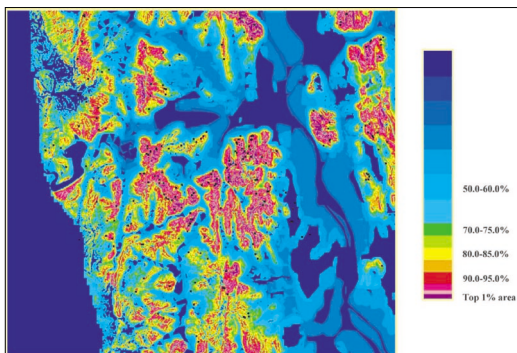


Fig. 5. Landslide susceptibility map of Boeun area

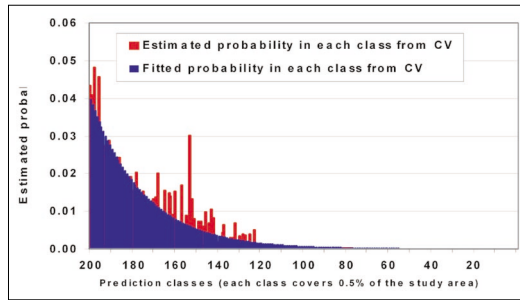
95% 이상 나타나는 지역은 보은읍내를 중심으로 북부 및 남부 지역에서 집중적으로 나타났다.

본 지역은 지질도에서 화강암이 위치한 곳에 해당되며, 본 암상에서 산사태가 집중적으로 일어남으로써 산사태 취약성이 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한 같은 화강암 지역 내에서도 죽전리 운모화강암지역에서 산사태 취약성이 높는데, 이러한 원인은 모암이 심층풍화가 상당히 진행되어 지반 안정성이 떨어졌기 때문이다. 한편 화강암 지역 내에서도 임상이 리기다소나무림과 잣나무림 지역의 산사태 취약성이 높는데, 이러한 결과는 일반적으로 침엽수림 지역에서 더 많은 산사태가 발생한다고 보고된 결과(최경, 1986)와 대체로 일치한다. 또한 토양배수가 양호한 지역, 지형경사각은 25~35° 지역, 사면방위는 NW~NE쪽에 이르는 지역에서 우도비가 높게 나타나 매우 높은 산사태 취약성을 나타내고 있다. 반면에 연구지역의 서쪽은 낮은 산사태 취약성을 나타내고 있다. 연구지역의 좌측은 지질도상에서 황강리 퇴적층이 위치하는 곳으로 이곳에서 산사태가 거의 발생하지 않았기 때문에 낮은 우도비 값을 나타내는 지역에 해당된다.

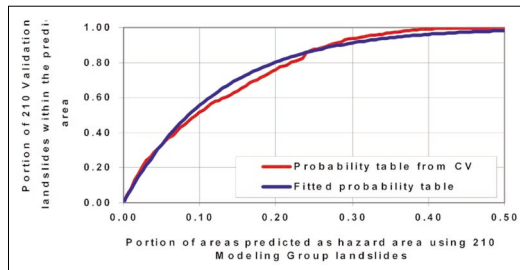
2. 검증단계

인명과 관련된 산사태 위험 지도를 작성하기 위하여는 지도 자료층 DB로써 공간을 경험적으로 측정하기 위한 검증자료인 예측비율곡선과 Fig. 5의 산사태 취약성분포도가 필요하다. 예측비율 및 그에 상응하는 추정 발생 확률을 보여 주는 곡선을 Fig. 6에 제시하였다.

일반적으로 예측비율곡선에서 x축 값은 전체 연구지역의 전체면적에 대한 모델작성을 통해 계산된 특정 결과 값까지의 면적의 비율을, y축 값은 0%부터 특정 x값까지에 포함된 산사태 발생수의 전체에 대한 누적 비율을 의미한다. Fig. 6에서 보는 것처럼 상대적인 산사태 발생 확률이 높은 상위 20%를 임의로 선택할 경우 그 부분에서 전체 산사태의 80%가 포함된다는 것을 의미하며, 50%를 임의로 선택할 경우 산사태의 100%가 포함된다는 것을 나타내고 있다. 따라서, 적은 면적에 많은 검증위치도



(a) Estimated probability for each of the 200 classes



(b) Prediction rate curve

Fig. 6. Estimated probability of landslide occurrence for each prediction class and the corresponding prediction-rate curve in the Boeun area

의 산사태가 위치하여 예측이 잘 된 결과 일수록 곡선은 기울기가 가파르고 곡선의 모양이 좌상으로 치우친 모양을 하게 된다(Park *et al.*, 2003).

본 연구에서는 예측 결과의 신빙성을 평가하기 위해 420개의 산사태는 각각 210개의 두개의 그룹으로 무작위 추출법에 의해 나뉘었다. 나누어진 첫 번째 그룹은 산사태 예측에 사용하였으며, 나머지 그룹은 검증에 사용하였다. 특히, 1998년에 44개의 산사태에 해당하는 200픽셀은 위험 클래스로 분류하여 산사태 발생 확률 예측 값으로 사용하였다. 따라서 200개의 위험 클래스(각 클래스는 지표의 2.92km²를 차지)는 첫 번째 210개의 산사태 그룹을 이용하여 구성하였으며, 본 200개의 위험 클래스는 각 클래스의 많은 양의 수를 합함으로써 또 다른 210개의 그룹의 구분과 비교하였다.

그 결과, 본 연구에서는 상위 10%의 영역에서 50% 정도의 예측 능력을 보이고 있다. 이렇게 계산된 예측 값을 미래의 산사태와 연관시켜 해석하면 다음과 같다. 연구대상지역에서 상위 10%를 미래의

산사태에 대해서 가장 취약하다고 간주한다면, 미래에 발생할 flow type의 산사태 중에서 50%가 그 지역에서 발생할 것으로 해석할 수 있다. 만약 앞으로 지형, 토양, 임상, 지질의 상태에 커다란 변화가 없다고 가정하면, 동일한 자료와 예측 방법론을 사용하였기 때문에 이러한 예측결과는 Fig. 5에 제시한 예측 결과에서 각 클래스의 정량적 해석에 이용할 수 있다.

3. 위험평가

본 연구에서는 사실적인 시나리오를 통해서 200 픽셀이 1998년의 산사태 발생에 영향을 줄 수 있다는 가정을 하였다. Fig. 6(a)의 그래프를 통해 드러난 단조로운 기능 감소를 이용하여, 본 연구에서는 조건적인 미래 산사태의 발생 가능성을 추정할 수 있다.

Fig. 7은 이상의 결과자료를 가지고, 수식(1)을 이용하여 산사태 인명 위험도를 작성한 결과이다. 산사태 인명 위험도 작성의 기본적인 가설은 1998년 발생한 44번의 산사태 면적이 200 화소를 차지하여, 1999년 이후로 동일한 수의 화소에 해당하는 지역에 산사태가 발생한다면 얼마나 많은 인명피해가 어느 곳에서 일어날지를 추정한 결과이다. 별래 비율은 산사태에 의해 예상되는 희생자의 수를 가리킨다. 위험도 지도 아래의 막대그래프는 각각의 5m×5m 화소가 산사태의 영향을 받을 것으로 추정되는 확률을 나타내며, 이는 Fig. 6에 나타난 위험 예측 지도의 검증을 통해 얻어졌다.

연구결과, 개별 화소에서의 위험도는 낮았으나 위험도를 모두 합하면 예상 사망자의 총 수는 3.14명이었다. 이는 1998년의 연구지역의 실제 사망자수인 3명에 상당히 근접한 수치이다. 특히 추정된 1/100명의 위험 지역들은 연구지역 내에서 실제 위험도가 가장 높은 지역들로 1998년 산사태 발생시 인명피해가 났던 지역들이다(보은군, 1998).

본 연구에서 사망자 추정치가 실제 사망자수와 비슷하다는 것은 픽셀 당 추정 가능성이 충분히 “논리적”이라는 것을 의미한다. 그러나 실제 분석결과,

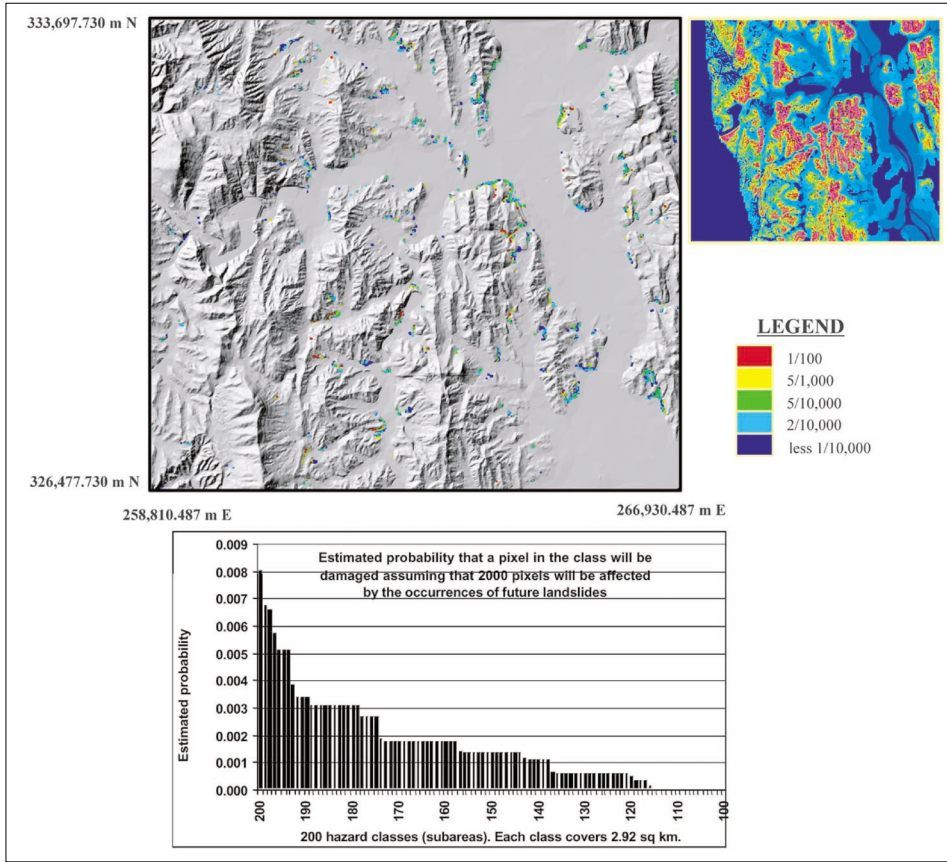


Fig. 7. 5m × 5m life risk map of the Boeun area

The histogram below provides the estimated probability for each pixel from the hazard cross validation.

높은 인명위험 지역이 예측 모델에 의해 추정된 가장 위험한 클래스와 일치하지 않았다. 즉, 117~134 항목까지는 가장 위험하지만, 180~200 항목은 그다지 높지 않았다. 왜냐하면 본 지역은 낮은 인구 밀도로 인하여 산사태 피해가 발생하여도 인명피해가 최소화되기 때문이다. 따라서 본 지역에서 가장 위험한 인명피해 지역은 예측이 가능한 위험 지역의 중간영역이다.

V. 결론

본 연구에서는 충북 보은지역을 대상으로 기존에 작성된 산사태 발생 취약성 및 예측도를 이용하여 산사태 인명 위험도 작성기법을 제안하였다. 특히, 미래의 산사태 발생에 의한 인명손실을 추정하기 위

해 3단계의 공간데이터 분석 방법을 제안하여 산사태 인명 위험도를 작성하였다. 즉, i) 미래 재해의 위험 예측지도 구성, ii) 예측 결과의 타당성/신뢰성 및 예측되는 위험 수준 각각의 발생 확률의 평가, iii) 첫 번째 과정에서의 예측 지도와 두 번째 과정에서 예측된 확률을 인구분포도 자료와 결합하여, 가정 혹은 확립된 취약 수준을 나타내는 인구분포도 요인이 도입된 산사태 인명 위험도 작성 순이다.

산사태 취약성도 작성결과, 보은지역의 산사태 취약성이 95% 이상 나타나는 지역은 보은읍내를 중심으로 북부 및 남부 지역에서 많이 나타나며, 연구 지역의 좌측에서는 낮은 산사태 취약성을 나타내고 있다. 예측비율곡선을 이용하여 검증한 결과, 연구 지역에서 산사태에 가장 취약한 상위 5%, 10% 지역에서 대략 35%, 52%의 예측 능력과 같은 정량적 결

과를 얻을 수 있었다.

산사태 인명 위험도 작성결과, 개별 화소에서의 위험도는 낮았으나 위험도를 모두 합하면 예상 사망자의 총 수는 3.14명 추정되었다. 특히 추정된 1/100명의 위험 지역들은 연구지역 내에서 실제 위험도가 가장 높은 지역들로 1998년 산사태 발생으로 3명의 사망자가 발생했던 지역들이다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때, 산사태 인명 위험도는 자료 레이어, 예측 모델, 미래의 피해 예상 사고의 수치와 크기 등과 관련하여 매우 정확한 예측 방법이라 할 수 있다. 특히, 본 위험도는 정책결정자들에게 사실적인 피해상황 예측을 전달할 수 있어서, 재해방재에 유용한 자료로 활용될 수 있다. 또한 본 방재예방 모델은 향후 중요한 교통로나 다른 위험 대비 또는 재난 준비의 연구 등을 통해 쉽게 일반화가 가능할 것이다. 또한 다양한 단계의 산사태 위험도 작성은 이들에게 주어진 발생 가능한 미래 재해발생 예측이 가능할 것이다. 즉, 재해예측이 가능하다면, 모든 미래 사고를 예방 및 최소화 할 수 있을 것이다.

그러나 본 연구는 특정지역의 단일 사례 연구로, 향후 본 산사태 인명 위험도 작성의 일반화를 위해 보다 많은 사례연구가 필요하며, 또한 재산과 관련된 경제적 손실 위험도 등도 작성할 예정이다.

사 사

이 연구는 한국과학기술평가원(KISTEP)의 국가 지정연구실 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(#m1020300000702j000000510).

참고문헌

국립방재연구소, 2001, 홍수재해지도 작성 제도화 및 침수예상지역 추정 방법 개발(I).
 김명국, 1997, 경상지역의 산사태 문제 분석에 대한 연구, 배재대학교 석사학위논문.
 류주형, 이사로, 원중선, 2002, 인공신경망을 이용

한 산사태 발생요인의 가중치 결정, 한국사원환경지질학회, 35(1), 67-74.
 마호섭, 1994, 산지사면의 붕괴위험도 예측모델의 개발 및 실용화 방안, 한국임학회지, 83(2), 175-190.
 박노옥, 지광훈, Chung, F.C., 권병두, 2003, 우도 비함수와 베이지안 결합을 이용한 공간통합의 산사태 취약성 분석에의 적용, 한국지구과학학회지, 24(5), 428-439.
 박노옥, 지광훈, 장동호, 2004, 통계적 공간통합 모델을 이용한 태풍루사로 발생한 강릉지역 산사태 취약성 분석, 한국지형학회지, 11(4), 69-80.
 박노옥, 지광훈, Chung, F.C., 권병두, 2005, 산사태 취약성 분석을 위한 GIS 기반 확률론적 추정모델과 모수적 모델의 적용, 자원환경지질학회지, 38(1), 45-55.
 보은군, 1999, 보은군 수해백서.
 보은군, 2004, 보은군 통계연보.
 신영수, 1999, 산사태 발생 추정 요소에 관한 연구, 단국대학교 석사학위논문.
 신은선, 1996, 지리정보시스템(GIS)을 이용한 보령·서천지역의 산사태 분석, 충남대학교 석사학위논문.
 이사로, 1999, GIS를 이용한 산사태 취약성 분석기법 개발 및 적용 연구, 연세대학교 박사학위논문.
 이사로, 지광훈, 박노옥, 신진수, 2001, 산사태와 지형공간정보의 연관성 분석을 통한 장흥지역 산사태 취약성 분석, 자원환경지질, 34(2), 205-215.
 장동호, 박노옥, 지광훈, 김만규, Chung, F.C., 2004, GIS 기반 베이지안 예측모델을 이용한 보은지역의 산사태 취약성 분석, 한국지형학회지, 11(3), 13-23.
 최 경, 1986, 한국의 산사태 발생요인과 예지에 관한 연구, 강원대학교 박사학위논문.
 한국지질자원연구원, 2003, 산사태예측 및 방지기술.

- Bell, R. and Glade, T., 2004, Multi-hazard analysis in natural risk assessment. In Brebbia C. A., ed., Risk Analysis IV, Southampton, Boston, WIT Press, 196-206.
- Brand, E. W., 1985, Landslide in Hongkong Special Lecture, 8th Southeast Asian Geo. Conf., 1-15.
- Chung, F. C. and Fabbri, A. G., 2003, Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping, *Natural Hazards*, 30, 451-472.
- Chung, F. C. and Fabbri, A. G., 1993, The representation of geoscience information for data integration, *Nonrenewable Resources*, 2, 122-139.
- Chung, F. C. and Fabbri, A. G., 1998, Three Bayesian prediction models for landslide hazard, In, A. Bucciatti, ed., Proc. of International Association for Mathematical Geology Annual Meeting, 204-211.
- Chung, F. C. and Fabbri, A. G., 1999, Probability prediction models for landslide hazard mapping, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65, 1389-1399.
- Duda, R. O., Hart, P., and Nilsson, N., 1976, Subjective Bayesian methods for rule-based inference systems, Proceedings of the 1976 national Computer Conference, 1075-1082.
- Einstein, H. H., 1988, Landslide risk assessment procedure, Proceeding of the fifth international symposium on landslide, 2, 1075-1090.
- Fabbri, A. G., Chung, C. F., and Jang, D. H., 2004, A software approach to spatial predictions of natural hazards and consequent risks, In, Brebbia C.A., ed., Risk Analysis IV. Southampton, Boston, WIT Press, 289-305.
- Komac, M., 2004, Statistical landslide prediction map as a basis for a risk map, In Brebbia C. A., ed., Risk Analysis IV. Southampton, Boston, WIT Press, 318-330.
- Liguori, V. and Mortellaro, D., 2004, Geomorphic hazard and risk in Platani's ba-sin: landslide risk valuation. In Brebbia C. A., ed., Risk Analysis IV. Southampton, Boston, WIT Press, 163-175.
- Park, N. W., Chi, K. H., Chung, F. C., and Kwon, B. D., 2003, Application of spatial data integration based on the likelihood ratio function and bayesian rule for landslide hazard mapping, *The Journal of Korean Earth Science Society*, 24(5), 428-439.
- Varnes, D. J., 1984, Landslide hazard zonation: A review of principles and practice, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 9-59.
- Wakens, A. T. and Koirala, N. P., 1986, Bulk appraisal of slope in Hong Kong, Landslide proc. 5th Int. Symp. on Landslide, A. A. Balkema, 1181-1187.