

산사태예측도에 의한 석조문화재 주변의 산사태재해 가능성 분석

김경수* · 이춘오 · 송영석 · 조용찬 · 김만일 · 채병곤

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

Analysis of Landslide Hazard Probability for Cultural Heritage Site using Landslide Prediction Map

Kyeong-Su Kim*, Choon-Oh Lee, Young-Suk Song, Yong-Chan Cho,
Man-Il Kim, and Byung-Gon Chae

Geological & Environmental Hazards Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

산사태가 일어날 지점을 예측한다든지 사태물질로 인한 피해 예상지역을 알아내는 것은 쉬운 일이 아니다. 이는 산사태를 발생시키는 요인들이 여러가지가 있고 개개의 요인들이 산사태를 발생시키는데 기여하는 중요도도 서로 다르기 때문이다. 그러나 많은 산사태자료에 대한 분석을 바탕으로 발생 메커니즘 규명과 통계적 해석기법을 통해 산사태 발생가능성의 예측과 위험지역의 분류가 가능해졌다. 석조문화재가 산사면 또는 그 직하부에 인접해 있는 경우는 산사태가 발생되면 재해에 무방비로 노출되어 있다. 이 연구에서는 여름철의 집중호우 등에 의해 석조문화재 및 그 주변지역에 산사태가 발생할 가능성을 사전에 예측함으로써 그로 인한 석조문화재의 피해가능성을 분석하고자 하였다. 이러한 목적을 위해 2002년 8월 산사태재해로 인해 피해가 발생한 바 있으며 중요 석조문화재가 위치해 있는 실상사 백장암지역을 연구대상지역으로 선정하여 산사태예측도를 작성하였다. 그리고 산사태재해 가능성을 발생확률로 표현하여 등급별로 구분함으로써 석조문화재 및 그 주변지역이 산사태에 취약한지의 여부를 평가하였다. 또한, 이러한 조사 및 해석기법을 앞으로 석조문화재 주변의 산사태재해 예측 및 평가를 위해 실용적으로 활용할 수 있는 토대를 마련하였다.

주요어 : 집중호우, 석조문화재, 산사태예측도, 산사태재해

It is a very difficult thing to estimate an occurrence possibility location and hazard expectation area by landslide. The prediction difficulty of landslide occurrence has relativity in factor of various geological physical factors and contributions. However, estimation of landslide occurrence possibility and classification of hazard area became available correlation mechanism through analysis of landslide occurrence through landslide data analysis and statistical analysis. This study analyzed a damage possibility of a cultural heritage area due to landslide occurrence by a heavy rainfall. We make a landslide prediction map and tried to analysis of landslide occurrence possibility for the cultural heritage site. The study area chooses a temple of Silsang-Sa Baekjang-Am site and made a landslide prediction map. In landslide prediction map, landslide hazard possibility area expressed by occurrence probability and divided by each of probability degrees. This degree used to evaluate occurrence possibility for existence and nonexistence of landslide in the study site. For the prediction and evaluation of landslide hazard for the cultural heritage site, investigation and analysis technique which is introduced in this study may contribute an efficient management and investigation in the cultural heritage site, Korea.

Key words : heavy rainfall, cultural heritage, landslide prediction map, landslide hazard

*Corresponding author: kks@kigam.re.kr

서 론

석조문화재 주변의 환경적인 용인들이 복잡하게 작용하여 석조문화재에 대한 손상이 발생된다(Riederer, 1973). 따라서 석조문화재의 손상을 야기하는 외적 요인 즉, 산사태, 지진 등과 같은 자연재해에 대한 위험성에 측과 평가가 수행되어야 할 것이다. 우리나라의 석조문화재 대다수는 별다른 보호시설 없이 야외에 노출상태로 있고 이들 중 상당수는 산지에 분포되어 있다. 이처럼 산지에 분포되어 있는 석조문화재는 산사태가 발생할 경우 막대한 피해가 발생할 수 있다. 따라서 석조문화재의 효율적인 관리와 보존을 위해서는 석조문화재 주변의 자연사면에 대한 산사태위험성을 예측하는 것이 반드시 필요하다. 그리고 산사태재해 발생가능성이 높은 경우에는 그에 따른 대응방안이 강구되어야 할 것이다.

본 연구에서는 중요 석조문화재가 위치하고 있는 실상사 백장암 주변에 대한 산사태재해 가능성을 예측하였다. 자연사면에 대한 산사태예측은 통계적 방법의 하나인 로지스틱회귀분석을 통해 수행되었다. 로지스틱회귀분석에 의한 산사태예측모델은 김원영 외(2003)에 의해 개발되었다. 연구지역에 대한 현장조사와 실내시험 및 분석과정을 통해 산사태에 유의한 영향요소를 평가하고 그 자료들을 예측모델에 적용하여 산사태예측도를 작성하였다. 그리고 산사태예측도에 의해 발생확률을 등급별로 분류함으로써 산사태로 인한 석조문화재의 피해 가능성을 검토하였다.

사례연구

Canuti et al.(2001)의 연구에 따르면, 산사태와 같은 지형 및 지질학적 특성에 의한 재해로부터 문화유산을 보호하기 위해 IGCP-425에 동참하고 있는 이탈리아, 그리스, 이집트, 호주, 러시아, 슬로바키아, 체코, 불가리아 및 루마니아 등은 문화유적지에서의 자연재해 중 산사태에 의한 피해가 가장 많은 것으로 조사되었으며, 특히 낙석, 전도파괴, 그리고 슬라이드 형태의 산사태가 주요 재해원인으로 분석되었다. 그리고 대상지반의 암석학적 조건과 주변 암반의 지질공학적 조건인 단층과 절리 등에 의해 자연재해가 발생하는 것으로 보고되었다.

Grief et al.(2006)은 일본 중부지방에 위치한 중세시대의 Bitchu-Matsuyama성에 대한 정밀계측 및 안정성 분석을 수행한 바 있다. 수직절리가 잘 발달되고 높은 절벽을 이루는 지형특성을 지니고 있는 연구지역에 대

한 계측결과 절리들의 간격이 점진적으로 증가되었으며 성이 위치한 상부지점에서의 변위가 가장 큰 것으로 나타났다. 그리고 낙석 내지 전도파괴의 잠재성과 완만한 경사지점에서는 퇴적 침식된 풍화도 및 돌덩어리들에 의해 토석류산사태가 발생할 가능성이 있는 것으로 보고하였다.

이중윤과 박형동(2004)은 경주 남산 냉골에 위치한 지방유형문화재 제158호인 마에여래대좌상을 대상으로 현장조사와 시물레이션을 통하여 낙석 및 붕괴위험성을 정량적으로 판단한 바 있다. 그 결과 불상의 두부에는 최대 23 kJ이, 그리고 제단의 중앙에는 최대 69 kJ의 충돌에너지가 발생되었는데, 이는 불상이나 인명에 피해를 줄 수 있을 정도의 크기로 향후 이를 방지하기 위한 대책마련이 시급하다고 보고한 바 있다.

연구지역

연구대상지역은 전북 남원시 산내면 대정리 975번지의 실상사 백장암이 위치한 곳으로서 경위도상으로는 동경 127°37'00"~127°37'30", 북위 35°26'00"~35°26'40"의 범위에 해당한다. 백장암에는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 석조문화재로서 국보 제10호인 실상사 백장암삼층석탑과 보물 제40호인 실상사 백장암석등이 있다. 백장암은 사찰 상부의 삼봉산(1,185.7 m)으로부터 아래봉(1,165 m)으로 연결된 능선에서 772.5 m 봉우리의 동남방향에 위치하고 있다. 지형은 매우 험준하여 고도가 높고 사면경사가 급하다. 지질은 삼봉산을 중심으로 거의 동서방향으로 흑운모편암이 분포하고 있으며 엽리가 잘 발달되어 있다. 엽리의 일반적인 주향과 경사는 N35~60°E, 55~80°SE 내지 NW이며, 운모편암과 규암 등이 박층으로 협재하기도 한다. 유동성산사태의 주 대상이 되는 토층의 층후는 대부분 1 m 내외로서 비교적 얇은 분포를 보이고 있으며 최대 3 m 정도이다.

산사태 예측기법

산사태 조사 및 예측은 오랜 기간동안 산사태와 그 발생지역에 대한 연구에서 매우 중요한 부분으로 알려져 왔다(Philbrick & Cleaves, 1958; Sowers & Royster, 1978). 산사태를 조사할 경우에는 사면붕괴의 원인 및 형태의 확인이 직접적으로 이루어져야 하며, 실제 혹은 산사태에 대한 잠재적 예측이 필요하다. 산사태의 원인규명과 형태분류 및 예측 등은 산사태의 예방이나 복구를

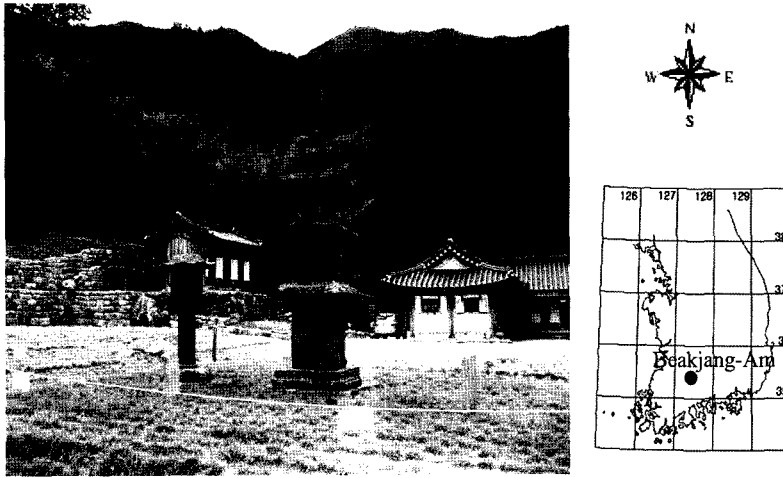


Fig. 1. The three-story stone pagoda and stone lamp located in Beakjang-Am.

위해 적합한 방안을 수립하는데 매우 중요하기 때문이다.

Rid & Liang(1978)은 산사태를 조사할 때 4개의 기본적인 지표에 대하여 참고자료가 마련되어야 한다고 제안한 바 있는데, 그 4개의 기본적인 지표는 다음과 같다. 첫째는, 만약 적절한 시기에 적합한 조사가 진행되었다면 대부분의 산사태 혹은 잠재적인 사면활동은 예측이 가능하다는 것이다. 둘째는, 산사태를 예방하는데 소요되는 비용은 산사태를 복구하는데 소요되는 비용보다 적다는 것이다. 셋째는, 대규모 산사태의 경우에는 구조물의 피해예방을 위해 소비하는 비용보다 매우 많은 복구비용이 소요될 것이다. 그리고 넷째는, 초기의 사면 붕괴는 부가적인 불안정조건과 활동에 의해 일어난다는 것이다. 산사태는 지속적으로 변화되는 현상이기 때문에 현장조사만으로 모두를 알 수 없을 뿐만 아니라 쉽게 정의할 수도 없다. Johnson and DeGraff(1988)는 산사태를 조사할 때 조사의 체계화, 자료의 선별, 자료의 분석, 해석기법의 적용 및 결과토의의 5개 요소가 포함되어야 한다고 제안한 바 있다. 따라서 이들 5개 요소들을 포함하여 문화재 주변 자연사면의 산사태예측에 활용할 수 있는 산사태 조사 및 분석기법을 수립하였다. 한편 이 기법은 본 연구의 궁극적이고 최종적 목표라고 할 수 있는 문화재 주변의 산사태예측에 이용될 수 있을 것이다.

조사, 분석 및 예측의 체계

앞에서 언급하였듯이 Johnson and DeGraff(1988)는 산사태를 조사할 때 조사의 체계화, 자료의 선별, 자료

의 분석, 해석기법의 적용 및 결과토의에 대한 요소들이 반드시 적용되어야 한다고 제안한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 요소들을 반영하여 문화재 주변의 산사태예측을 위한 조사 및 해석기법을 체계화하였는데, Fig. 2는 이를 흐름도로 표현한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 산사태를 조사, 분석 및 예측하는 과정은 크

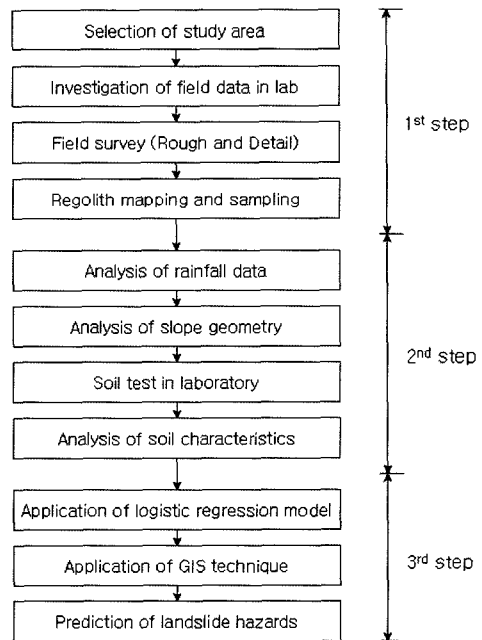


Fig. 2. Flow chart of investigation and analysis techniques of landslides in natural slopes.

계 3단계로 구분할 수 있다. 즉, 체계적인 현장조사단계, 현장특성 평가 및 분석단계, 산사태 예측기법 적용단계로 구분된다. 이 가운데 2단계까지가 산사태를 조사하고 분석하는 과정이며 3단계는 조사 및 분석자료를 기존의 예측모델에 적용하여 산사태를 예측하고 평가하는 과정이다.

예측모델

산사태 예측기법은 한계평형해석 및 유한요소해석에 의한 해석적 방법과 지형, 지질, 토질특성, 사면파괴유형 등 사면관련 자료의 확률론적 분석에 의한 통계적 방법으로 나눌 수 있다. 해석적 방법은 주로 한계평형이론을 도입하여 사면을 모델화하고 해석함으로써 사면안전을 구하는 방법이다. 그리고 통계적 방법은 사면에 관련된 각종 자료(지형조건, 지질분포, 토질특성, 사면파괴유형 등)를 획득하고 이를 확률론적인 이론을 도입하여 사면안정성을 예측하는 방법이다(홍원표 외, 2004).

과거의 산사태예측은 대부분 연구자의 주관이 반영된 결정론적 방법에 의존하여 왔다. 그러나 산사태를 발생시키는 인자들이 매우 복잡할 뿐만 아니라 각 지역마다 산사태 발생원인과 인자들이 서로 다르게 나타남으로 인하여 결정론적 방법에 의존한 산사태 예측은 점차 줄어들게 되었다. 따라서 복잡한 산사태 발생인자들을 최대한 이용하고 이들 상호간의 특성을 고려한 확률론적 산사태예측모델을 적용하여 석조문화재 주변에 대한 산사태를 확률로써 예측하고, 산사태재해 가능성을 등급별로 분류하였다.

이 연구에서 석조문화재 주변의 산사태예측을 위해 김원영 외(2003)에 의해 개발된 확률론적 산사태예측모델을 적용하였다. 이 모델에서는 암질, 입도, 간극율, 밀도, 투수계수, 고도 및 사면경사의 7개변수를 이용하여

산사태 발생확률을 계산하게 된다. 연구지역으로부터 수집한 지질자료, 지형자료 및 토질자료를 이용하여 각각의 변수들에 대한 주제도를 작성하고 이를 중첩시켜 산사태예측도를 작성하고 발생가능성을 확률로 표현하였다. 김원영 외(2003)는 이러한 과정을 통해 작성된 산사태예측도에서 발생확률 70% 이상인 지역은 산사태 발생가능성이 높은 지역으로 간주할 수 있다고 보고하였다.

산사태 영향요소 분석

강우양상 및 산사태특징

이 지역에서는 2002년 8월 31일~9월 1일 사이에 태풍 韃靼의 영향으로 지리산의 어름터일대에서 최대일강우량 651 mm 및 누적강우량 702 mm를 기록하는 등 집중호우가 쏟아져 많은 산사태가 발생되었다(Fig. 3). 그리고 이들 산사태로 인해 8명이 목숨을 잃었으며, 가옥 12채가 전파되고 마천중학교가 폐쇄되는 피해가 초래되었다. 산사태는 백장암으로부터 불과 10 km 정도 떨어진 마천면소재지를 중심으로 북부에 위치한 백운산(902.7 m) 북측사면과 남서부에 위치한 삼정산(1,182.2 m) 남측사면에서 집중적으로 발생되었다. 이 지역일대의 수계는 주로 남북으로 형성되어 있으며 이들은 조사지역의 중앙부에서 동쪽방향으로 흐르는 임천강에 합류된다. 이 지역은 다량의 흑운모와 각섬석을 함유한 염기성 반려암이 넓게 분포되어 있는 곳으로 현장조사 결과 백장암 주변에서는 총 47개 산사태가 발생한 것으로 확인되었다. 전반적으로 사면고도 70% 이상인 높은 고도의 토층사면에서 원호형, 준원호형, 또는 전이형슬라이드로 시작되었으며, 사태물질들이 하부로 이동되면서 유동성산사태로 변화되는 양상을 보였다(김경수, 2005).

백장암삼층석탑 및 석등에 영향을 끼쳤던 칠성각 뒤

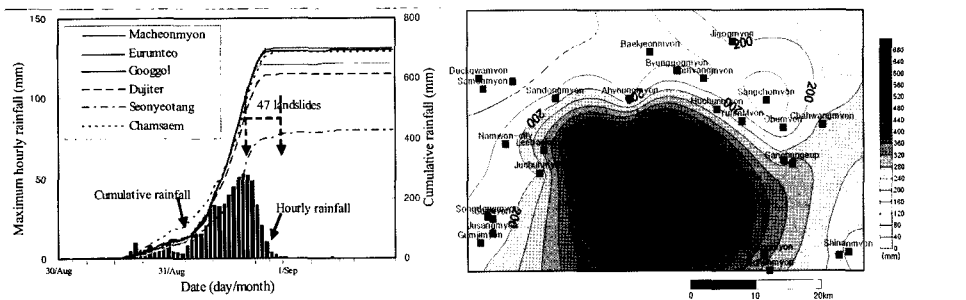


Fig. 3. The cumulative rainfall and the contour of rainfall in the area around Beakjang-Am.



Fig. 4. The damage occurred by landslides(2002) and present view of the recovered after 4 years(2006) in Beakjang-Am.

편의 산사태는 8월 31일 17:00 경에 발생되었다. 이 산사태는 길이 약 100 m, 폭 20 m 정도이고 깊이는 1 m 이내로 추정되어 중간정도 규모의 산사태인 것으로 조사되었다. 이 한 개의 산사태만으로도 최소 100m³ 이상의 사태물질이 삼층석탑 및 석등 바로 하부까지 이동되어 쌓이는 과정에서 큰 피해가 초래되었다. 피해상황으로는 선원건물 1동, 칠성각 1동, 요사채 1동이 전파되었고 축대 및 담장 100 m 정도가 붕괴되었다. 남원시재해대책상황실 집계에 따르면 2억6천7백만원의 재산피해가 발생되었으나 다행히 중요 석조문화재인 삼층석탑과 석등에는 사태물질이 하부기단을 덮는 정도로 그 피해가 미미하였다.

Fig. 4는 2002년 칠성각 뒤편사면에서 발생한 산사태로 인해 백장암 내 건물들과 석조문화재 주변의 피해상황과 복구완료 후 4년이 경과된 2006년 석조문화재 주변의 모습이다.

지형특성

지형특성을 분석하기 위해 1:5,000 수치지형도와

GIS프로그램을 이용한 3차원적 입체지형도를 이용하였다. Fig. 5는 지형특성 중에서 산사태에 유의한 영향요소로 간주되는 사면경사와 고도를 나타낸 것이다. 연구지역 내 자연사면을 구성하는 지형요소 중 경사를 살펴보면, 20~40° 범위의 경사를 갖는 사면이 전체 사면의 75.3%인 1.54 km² 정도를 차지해 가장 높은 비율의 사면경사를 차지하였다. 그리고 아주 높은 경사도에 해당하는 40~50° 및 50° 이상의 사면경사가 각각 4.8%와 0.2%를 접하여 전반적으로 경사도가 급한 사면지역임을 알 수 있다. 사면고도의 경우 해발고도를 기준으로 약 370 m 이상에 해당되는 고지대로서 470 m 이하가 전체 대상면적의 17.8%인 0.36 정도의 분포면적을 차지하고, 640 m 이상인 지역 또한 27.1%로 약 0.55 km²의 면적을 차지하고 있다.

토질특성

본 연구에서 백장암지역의 자연사면에 분포하고 있는 토층의 물리적 및 공학적 특성을 파악하기 위하여 총 15개소에서 토층시료를 채취하였다. 시료채취 위치는 지질과 지형조건 및 토층분포 등을 고려함으로써 토층의 특성이 균등하게 반영될 수 있도록 하였으며, 원지반의 표토를 제거한 후 40~60 cm정도의 깊이에서 불교란 및 교란시료로 구분하여 채취하였다. 불교란시료는 스테인레스로 제작된 원통형 샘플러(stainless ring sampler)를 이용하여 채취하였으며, 교란시료는 비닐팩을 사용하였다. 채취된 토층시료를 대상으로 비중, 함수비, 입도분석, 액성한계 및 소성한계 등의 물성시험을, 공학시험으로는 밀도, 간극비, 간극률, 포화도 및 투수계수를 구하였다. 제반 시험방법은 KS의 관련기준에 준하여 시험하였다.

입도분석결과에 의하면 모래의 함유비는 71.91~93.83%의 범위로서 평균 82.92%이고, 자갈크기 입자의 함유비는 평균 10.56%, 실트 및 점토크기 입자의 함유

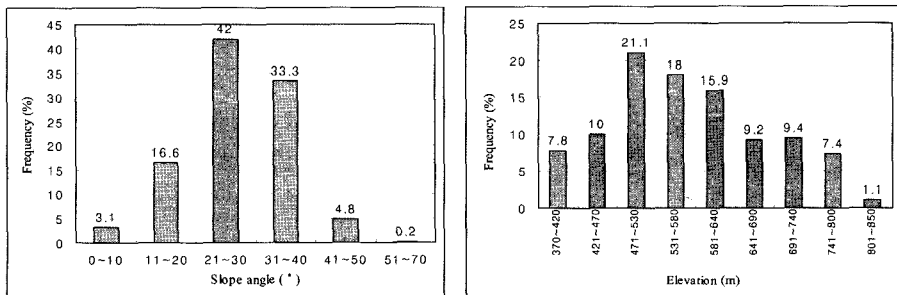


Fig. 5. The distribution of slope angle and elevation in the study area.

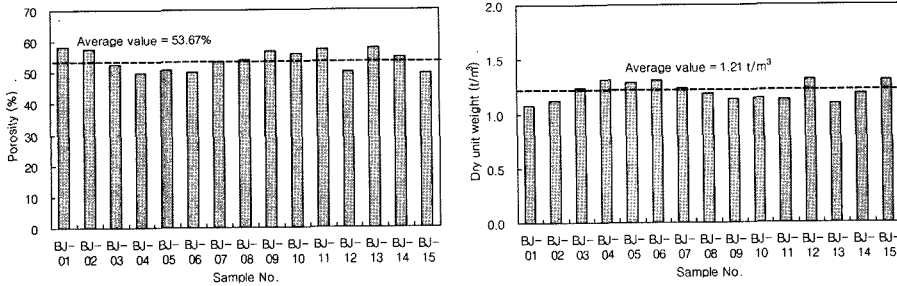


Fig. 6. Porosity and dry density of soils in the study area.

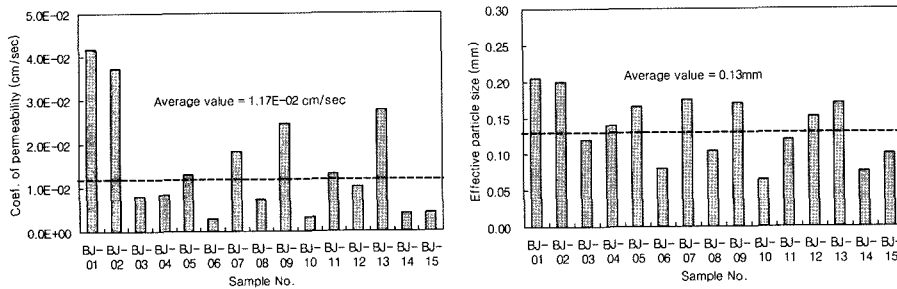


Fig. 7. Coefficient of permeability and effective particle size of soils in the study area.

량은 평균 6.53%인 것으로 나타나 토층시료의 거의 대부분이 모래질로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그리고 대상지역의 토층은 통일분류법에 의해 SW 혹은 SP로 분류된다.

Fig. 6은 연구지역 토층시료의 간극율과 건조밀도를 나타낸 것으로, 간극율은 49.59~57.91% 범위로서 평균적으로 48.16%의 값을 갖는다. 건조밀도는 1.10~1.32 t/m³ 범위에 있으며, 평균 1.21 t/m³인 것으로 나타나 토층지반이 대체로 느슨한 상태에 있음을 알 수 있다. 한편, 액성한계는 28.12~36.88% 범위로서 평균 31.74%이고, 소성지수는 10.90~17.84%의 범위에 있으며, 평균 13.53%인 것으로 나타났다.

Fig. 7은 토층시료의 투수계수와 투수계수에 관계되는 유효경을 나타낸 것으로, 투수계수는 2.78×10^{-3} ~ 2.77×10^{-2} cm/sec 범위로서 평균적으로 1.17×10^{-2} cm/sec의 값을 갖는데, 이는 평균치를 근거로 하였을 경우 Braja(1983)에 의해 제안된 굵은 모래의 투수계수에 해당된다. 그리고 유효경은 0.06~0.18 mm 범위이고 평균 0.13 mm로서 투수계수와 비교하였을 경우 유효입경이 큰 토층시료는 투수계수도 큰 값을 가지는 경향성을 보였다.

산사태 발생가능성 예측

조사지역에서 획득한 자료를 토대로 산사태예측도를 작성하여 산사태 발생확률을 산정하고, 산사태가능성을 예측하였다. 연구대상인 백장암지역은 총 2.045 km²로서 각 주체도를 연산하여 작성된 최종 산사태예측도는 Fig. 8과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 산사태 발생확률이 높은 지역은 석조문화재로서 국보 제10호인 실상사 백장암삼층석탑과 보물 제40호인 실상사 백장암석등이 있는 위치에서 위쪽으로 300 m 정도 떨어진 지점으로부터 능선부까지의 산사면에 분포하고 있으며 대체로 좁은 면적에 국한됨을 알 수 있다. 이를 다시 세분해 보면, 총 적층을 제외한 전체면적의 97%가 산사태 발생확률이 50% 미만인 것으로 예측되어 전체적으로 산사태에 안정적인 지역으로 분류된다. 또한, 51~70%의 발생확률을 갖는 면적은 1.9%로서 0.0383 km² 정도이고, 발생확률 70% 이상으로 산사태가 발생할 가능성이 높은 지역은 대상면적의 1.1%인 0.024 km² 정도로 비교적 적은 면적비율을 나타내었다(Table 1 및 Fig. 9). 이들 발생확률이 높은 지역은 모두 석조문화재가 위치한 백장암 상부지역에 밀집되어 있어 석조문화재가 산사태재해 위험

Table 1. The distribution of area according to the probability of landslides in the study area.

Probability of landslides(%)	Area()	Ratio(%)
0 ~ 50	1.9825	97.0
51 ~ 70	0.0383	1.9
71 ~ 90	0.0236	1.1
91 ~ 100	0.0004	0.0
Total	2.0448	100



Fig. 8. The landslide probability map of the study area.

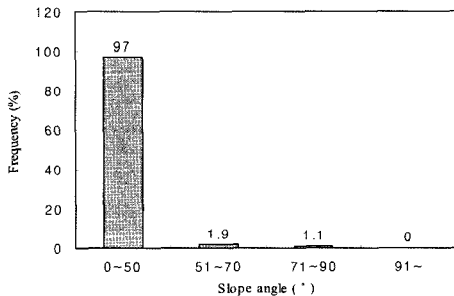


Fig. 9. The grading distribution according to the probability of landslides.

성에 노출되어 있음을 알 수 있다. 다만, 석조문화재에 직접적 영향권에 속하는 직상부의 산사면은 발생확률이 70% 미만으로 분류됨으로써 산사태재해 가능성이 낮은 것으로 분석되었다. 그 외 발생확률이 높은 지역으로 분류되는 지역은 사면고도가 높고 석조문화재보다 북동부에 위치하고 있으며 중간에 계곡이 위치해 있어 산사태가 발생되더라도 사태물질이 석조문화재에 직접적으로 유입될 가능성은 높지 않을 것으로 판단된다. 그러나 이 지역은 2002년 여름철에 집중호우에 의해 산사태가 많

이 발생되었을 뿐만 아니라 백장암에 직접적인 산사태 재해가 발생된 바 있기 때문에 항상 주의가 요망되는 지역이다.

결 론

본 연구에서는 석조문화재 및 주변지역의 산사태예측을 위한 연구체계를 정립하였으며, 석조문화재인 국보 제10호 실상사 백장암3층석탑과 보물 제40호 백장암석 등이 위치해 있는 실상사 백장암 주변에 대한 산사태 발생가능성을 예측하였다. 연구체계도에 따라 석조문화재 및 그 주변지역에서의 산사태 피해사례, 강우특성, 지질분포, 지형특성 및 토질특성 등 수집된 자료들을 로지스틱회귀모델에 적용하여 산사태예측도를 작성하였다. 그리고 작성된 산사태예측도를 토대로 산사태에 취약한 지역을 등급별로 분류하고 산사태발생시 석조문화재와 그 주변의 피해가능성을 분석하였다.

1) 연구대상지역에서 총적층을 제외한 전체면적의 97%가 산사태 발생확률이 50% 미만인 것으로 예측되어 전체적으로 산사태에 안정적인 지역으로 분류되었으며, 발생확률 70% 이상으로 산사태가 발생할 가능성이 높은 지역은 대상면적의 1.1%로서 비교적 좁은 면적분포를 보였다.

2) 백장암 주변지역에는 2002년 집중호우로 인해 많은 산사태가 발생된 바 있고, 본 연구에서 산사태예측도에 의한 분석결과 발생확률 70% 이상으로 산사태 발생 가능성이 예견되는 지역은 모두 백장암 상부 사면지역에 분포하고 있기 때문에 이들에서 산사태가 발생할 경우 중요 석조문화재에 피해가능성이 예상된다.

3) 따라서 집중호우시 대상지역에 대한 지속적인 주의 관찰이 필요할 뿐만 아니라 보다 근본적인 산사태재해 예방대책의 시행 등을 통한 중요 석조문화재의 항구적 유지보존이 요구된다.

사 사

본 연구는 국립문화재연구소에서 지원하는 “석조문화

재 재해예방시스템 구축” 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김경수, 2005, 국내 자연사면 산사태의 조사 및 해석 기법, 안동대학교 박사학위논문, 321p.
- 김원영, 채병곤, 김경수, 조용찬, 최영섭, 이춘오, 이철우, 김구영, 2003, 산사태 예측 및 방지기술 연구, 과학기술부, 326p.
- 이종윤, 박형동, 2004, 경주 남산 냥골 상선암 마에여래 대좌상부 암반사면 낙석의 위험성 분석, 한국지구시스템공학회지, 41(1), 26-38.
- 홍원표, 김원영, 송영석, 임석규, 2004, 인공신경망을 이용한 산사태 예측, 한국지반공학회논문집, 20(8), 67-75.
- Braja M. D., 1983, *Advanced Soil Mechanics*, The University of Texas at El Paso, 1-69.
- Canuti, P., Casagli, N., Falorni, G., and Fanti, R., 2001, The IGCP-425 Project on Landslide Hazard in Cultural Heritage Sites: General Framework and European Experiences, 1-8.
- Grief, V., Sassa, K., and Fukuoka, H., 2006, Failure mechanism in an extremely slow rock slide at Bitchu-Matsuyama castle site (Japan), *Landslides*, 3(1), 22-38.
- Johnson, R. B. and DeGraff, J. V., 1988, *Principle of Engineering Geology*, John Wiley and Sons, New York, 497p.
- Philbrick, S. S. and Cleaves, A. B., 1958, Field and laboratory investigations, in *Special Report 29: Landslide and Engineering Practice*, HRB(now TRB), National Research Council, Washington D.C., 93-111.
- Riederer, J., 1973, Staub-Reinhart, *Luft*, 33, 5.
- Rid, H. T. and Liang, T., 1978, Recognition and Identification, in *Special Report 176: Landslide: Analysis and Control*, TRB, National Research Council, Washington D.C., 34-80.
- Sowers, G. F. and Royster, D. L., 1978, Field investigation, in *Special Report 176: Landslide: Analysis and Control*, TRB, National Research Council, Washington D.C., 81-111.

김경수

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3054
Fax: 042-861-9723
E-mail: kks@kigam.re.kr

이춘오

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3131
Fax: 042-861-9723
E-mail: lco@kigam.re.kr

송영석

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3035
Fax: 042-861-9723
E-mail: yssong@kigam.re.kr

조용찬

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3059
Fax: 042-861-9723
E-mail: choych@kigam.re.kr

김만일

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3117
Fax: 042-861-9723
E-mail: mikim@kis.kgam.re.kr

채병곤

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3052
Fax: 042-861-9723
E-mail: bgchac@kgam.re.kr