GIS기반 토석류 산사태 대응공법 설계 프로그램 개발

송영석* · 채병곤

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Development of a GIS-based Computer Program to Design Countermeasures against Debris Flows

Young-Suk Song* and Byung-Gon Chae

Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

본 연구에서는 자연사면에서 토석류 산사태 대응공법의 설계 프로그램(CDFlow ver 1.0)을 개발하였다. 이 프로그램은 자연사면에서 발생하는 산사태의 발생 가능성을 평가할 수 있으며, 토석류 산사태로 인하여 발생하는 피해범위를 산정할 수 있다. 또한 이 프로그램은 토석류 산사태의 대응공법 위치와 규모를 설계할 수 있다. 이 프로그램은 가장 잘 알려진 지리정보시스템(GIS) 개발도구중의 하나인 ArcGIS 엔진에서 구동되도록 개발되었다. 그리고 유사동역학적인 습윤지수와 무한사면의 안정해석기법을 적용하여 산사태 발생가능성을 예측하였다. 계산된 사면안전율은 기준안전율과 비교하여 산사태 잠재발생 구간을 선정하고 이를 도면상에 표시하였다. 토석류량은 산사태 잠재발생 구간과 토층심도에 의해 산정된다. 그리고 누적 토석류량은 이동경로를 따라서 계산할 수 있다. 개발된 프로그램의 적용성을 평가하기 위하여 실제 산사태 발생현장을 대상으로 적용하였다. 산사태 발생현장은 강원도 인제군 덕산리에 위치하고 있으며, 대상수계에 4개의 사방댐이 설치되어 있다. 토질실험 및 현장조사결과를 토대로 산사태 발생가능성이 높은 구간과 토석류의 이동경로를 산정하였다. 해석결과 기존에 설치된 사방댐의 규모는 계산된 토석류량을 저장하기에 부족한 것으로 나타났다. 따라서 본 프로그램을 이용하여 토석류 산사태 대응공법의 설치위치와 규모를 합리적으로 산정할 수 있을 것이다.

주요어 : 토석류 산사태, 사방댐, 산사태 발생가능성, 토석류 이동경로, 컴퓨터 프로그램

We developed a computer program (CDFlow v. 1.0) to design countermeasures against debris flows in natural terrain. The program can predict the probability of landslides occurring in natural terrain and can estimate the zone of damage caused by a debris flow. It can also be used to design the location and size of countermeasures against the debris flow. The program is run using the ArcGIS Engine, which is one of the most well-known Geographic Information System (GIS) tools for developers. The quasi-dynamic wetness index and the infinite slope stability equation were applied to predict landslide probability as a type of slope safety factor. The calculated safety factor was compared with the required safety factor, and areas of high probable potential for landslides were then selected and represented on the digital map. The volume of debris flow was estimated using these areas of high probable potential for landslides and soil depth. The accumulated volume of debris flow can be calculated along the flow channel. To assess the accuracy of the program, it was applied to a real landslide site at Deoksan-ri, Inje-gun, Kangwon-Province, where four debris barriers have been installed in the watershed of the site. The results of soil tests and a field survey indicate that the program has great potential for estimating probable landslide areas and the trajectory of debris flows. Calculation of the capacity volume of existing debris barriers revealed that they had insufficient capacity to store the calculated amount of debris flow. Therefore, this program enables a rational estimation of the optimal location and size of debris barriers.

Key words : debris flow, debris barrier, landslide probability, trajectory of debris, computer program

*Corresponding author: yssong@kigam.re.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

급경사지재해는 사면지역의 지질학적, 지형학적 및 지반공학적 특성에 따라서 그 규모, 형태 및 발생빈도 등이 다르게 나타난다. 국내의 자연사면에서 발생하는 급경사지재해는 대부분 잔류토, 봉적토 및 충적토 등의 미고결층 즉, 토층에서 강우로 인한 습윤전선 하강, 간극수압 상승, 지표침식 등에 의하여 발생되고 있다(Song et al., 2005; 2007; 2012; Kim et al., 2006; Chae et al., 2007; Song and Hong, 2007; 2011)

지난 90여 년간(1917-2005) 전 세계적으로 발생한 자연사면 산사태 2,626개를 분석한 바에 의하면, 얇은 전이형 파괴(shallow translational slide)는 1,386개로 전체의 53%를 차지하고 있으며, 토석류 산사태(debris flow)는 1,109개로 전체의 42%를 차지하였다(Fausto et al., 2008). 한편, 한국의 경우는 지난 15년간(1991-2005) 10개 지역의 3,435개 산사태를 분석한 결과 얇은 전이형 파괴는 1,575개로 전체의 45.9%를 차지하고, 얇은 전이형 파괴와 토석류 산사태는 1,452개로 전체의 42.3%를 차지하며, 토석류 산사태는 143개로 전체의 4.2%를 차지하였다. 토석류 산사태의 경우 얇은 전이형 파괴와 함께 발생된 것을 포함하면 전체의 46.5%에 해당함을 알 수 있다.

이와 같은 토석류 형태의 산사태는 발생위치가 비록 인간의 생활권과 떨어져 있고 소규모이지만 사태물질의 많은 부분이 모래입자보다 큰 암편들로 구성되어 있고 빠른 속도로 사면하부로 이동된다. 따라서 사면의 하부에 위치하고 있는 인간의 생활권에 큰 피해를 줄 수 있다. 최근에도 집중호우로 인한 토석류 산사태로 인하여 많은 인명과 재산피해가 발생되었다. 2011년 7월 27일 오전 서울지역에 발생된 집중호우로 인하여 우면산 일대 약 13개 구간에서 토석류 산사태가 발생되어 19명의 사망자가 발생하였다. 또한 2011년 7월 27일 새벽 춘천시 신북읍 소양강댐 인근 춘천펜션 배후 사면에서 토석류 산사태가 발생되어 13명의 사망자가 발생하였다.

자연사면에서 발생하는 토석류 산사태는 토석류의 이동속도가 매우 빠르게 발생하므로, 사면 하부에 위치한 인명이나 시설물 등에 재해에 대비하여 사전에 대피 또는 방호대책이 이루어지지 않을 경우 치명적이고 직접적인 피해를 야기 시킨다. 우리나라에서 지난 30년간(1976-2005) 산사태재해로 사망한 사망자 중 평균 85%는 자연사면에서 발생한 토석류 산사태로 인하여 사망할 정도로 토석류 산사태로 인한 피해가 심각한 실정이

다(Park et al., 2006).

그러나 자연사면에서 발생하는 토석류 산사태는 자연현상에 의해 발생하는 것이므로, 산사태 자체의 발생을 원천적으로 저지하는 것은 불가능하다. 따라서 산사태로 인한 피해를 줄이는데 최선의 노력을 기울이는 것이 필요하다. 즉, 산사태가 발생할 가능성이 있는 지점을 사전에 예측하고, 이를 토대로 산사태에 대한 대책을 마련하여 인간의 생명과 재산의 피해를 최소화할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 자연사면에서 발생하는 산사태의 발생가능성을 예측하고, 토석류의 이동경로 및 토석류량을 산정할 수 있는 프로그램을 개발하고자 한다. 이를 토대로 토석류의 이동경로에 대하여 토석류량을 산정하고, 사방댐의 위치와 규모를 효과적으로 결정할 수 있으며, 기 설치된 사방댐의 적합성도 확인할 수 있다.

산사태 대응공법 설계 프로그램

본 연구에서 개발된 산사태 대응공법 설계 프로그램은 CDFlow (Countermeasure against Debris Flow) ver1.0로서 지형학적, 지질학적, 기상학적 그리고 지반공학적인 요인들과 정보공학적인 기법들을 종합적으로 고려하여 자연사면에서 발생하는 산사태의 발생가능성을 평가하고, 토석류에 의한 피해영향을 예측할 수 있다(Song et al., 2011).

본 프로그램은 지리정보시스템(GIS)의 개발도구 중에 하나인 ESRI사의 ArcGIS를 기반으로 하여 개발되었다. ArcGIS 자체는 GIS 애플리케이션이 아닌 소프트웨어 제품의 결합체이며, GIS 소프트웨어 컴포넌트인 ArcObjects라는 기본 라이브러리에 기반을 두고 있다. ArcGIS 개발의 핵심부분은 ArcObjects 소프트웨어 컴포넌트 라이브러리이다. ArcObjects는 클라이언트와 서버를 만들기 위한 크로스 플랫폼 GIS 소프트웨어 컴포넌트의 집합체라고 할 수 있다. 한편, ArcGIS와 Visual Studio 2008, .NET Framework, C# 등의 프로그램을 함께 활용하여 개발되었으며, 본 프로그램은 ArcGIS Engine상에서 구동되도록 개발되었다.

본 프로그램의 전체적인 흐름을 살펴보면 수치지형도를 이용하여 기본적인 데이터를 생성하고, 그 결과를 이용하여 흐름방향과 이동경로를 산정한다. 그리고 유사동역학적 습윤지수와 무한사면의 안정해석기법을 적용하여 사면안정성을 판단하고, 이를 토대로 토석류의 발생량을 산정하고 사방댐의 설치위치와 규모를 산정한다. Fig. 1은 본 프로그램의 흐름도를 나타낸 것이다.

Fig. 1. Flow chart of CDFlow v. 1.0.

먼저 등고선 정보를 가지고 있는 수치지형도로 부터 먼저 TIN (Triangulated Irregular Networks)을 생성하고 이를 토대로 DEM (Digital Elevation Model)을 생성하였다. 이와 같이 생성된 TIN 및 DEM을 이용하여 사면경사, 사면방향, 흐름방향 등을 작성한다. 이러한 기본정보를 작성한 후 흐름방향을 이용해서 누적흐름과 분수령을 결정한다. 격자의 흐름방향을 선정하기 위하여 단방향 흐름추적 알고리즘과 D8 알고리즘을 적용하였다. 그리고 누적흐름은 격자의 흐름방향 정보를 이용하여 유역내 각 격자의 흐름을 추적하는 과정에서 자신의 격자를 흐름경로로 포함하고 있는 상류 격자의 개수를 나타낼 수 있다. 따라서 최상류 격자의 흐름누적수는 “0”이 되며, 최하류 격자의 흐름누적수는 유역에 포함된 격자의 총 개수보다 1이 작은 값을 가지게 된다. 높은 흐름누적값을 가진 셀들은 흐름이 집중된 지역이고 하도(stream channel)를 추출할 때, 흐름누적값이 0 인 셀들은 주변보다 높은 지형으로 산등성이 추출에 사용될 수 있다. 누적흐름으로 나온 결과는 각 셀로 흘러 들어가는 흐름의 총량을 나타낸다고 볼 수 있다. 분수령은 관심영역을 설정하는데 사용되며, 누적흐름은 발생한 토석류의 이동경로를 추정하는데 사용된다. 이동경로를 이용하여 이동경로의 하천차수를 결정할 수 있고 DEM의 각 셀에서의 흐름선을 작성할 수 있다. 하천차수란 한 유역분지의 모든 하천을 크기에 따라 구간별로 나누어 매긴 일련의 차수를 말한다. 즉, 최상류의 작은 하천이 처음 다른 하천과 만나는 지점까지의 구간을 1차수하천

이라고 하면 두 개의 1차수하천이 만나면 2차수하천, 다시 두 개의 2차수하천이 만나면 3차수하천이 된다.

조사된 지반물성정보와 앞서 설명한 기본정보를 이용하여 기여면적, 흐름깊이, 포화깊이를 산정하여 습윤지수를 계산하고, 무한사면의 안정해석기법을 적용하여 사면안전율을 계산한다. 식 (1)은 유사동역학적 습윤지수를 이용한 무한사면의 안정해석식을 나타낸 것이다(Chae et al., 2011).

$$F_s = \frac{c + \cos \theta [1 - \omega(t) \cdot \gamma] \tan \phi}{\sin \theta} \quad (1)$$

여기서, c 는 점착력(kPa), θ 는 사면경사각(°), ϕ 는 흙의 내부마찰각(°), γ 는 흙의 단위중량에 대한 물의 단위중량비, $\omega(t)$ 는 포화깊이비이다. 포화깊이비는 유사동역학적 습윤지수의 분석결과에서 도출된 값이며, 이 값의 범위는 0에서 1사이의 값을 갖는다.

사면안전율이 계산된 다음 허용안전율을 지정하여 허용안전율보다 작은 값을 갖는 영역만을 표시한다. 허용안전율보다 작은 값을 갖는 영역에 대하여 이동경로를 찾아내고, 해당 이동경로에 사방댐을 설치한다. 사방댐의 경우 설치위치를 정하고 높이를 입력하면 자동적으로 사방댐의 용량을 계산할 수 있다. 이와 같이 계산된 사방댐의 용량을 토대로 사방댐이 설치된 지역의 영향 범위를 표시할 수 있다. 그리고 허용안전율보다 작은 값을 갖는 영역과 해당 위치에서의 토층깊이를 고려하여 토석류량을 계산하고, 이동경로에 설치된 사방댐의 용량과 비교하여 사방댐의 적정성을 평가하게 된다.

Fig. 2. Satellite view of the study area (Inje-gun, Kangwon province).

토석류 산사태 대응공법 설계 프로그램 적용성 평가

개발된 토석류 산사태 대응공법 설계 프로그램 (CDFlow ver 1.0)의 적용가능성을 평가하기 위하여 기존에 산사태 대응공법 설치구간을 대상으로 개발된 프로그램을 적용하여 기존 대응공법의 적합성을 검토하였다. 먼저 국내 사방시설이 설치된 지역 중 연구대상지역을 선정하고, 현장조사 및 토질조사를 수행한다. 토질조사 결과를 이용하여 해석프로그램의 입력인자를 선정하고, 해석프로그램을 이용하여 대상지역에 대한 토석류 발생위험지역과 토석류 이동경로를 산정한다. 이를 토대로 누적 토석류량을 결정할 수 있으며, 해당위치에 대한 사방댐의 적정성을 평가할 수 있다.

대상구간 선정

개발된 프로그램(CDFlow ver1.0)의 적용가능성을 평가하기 위하여 기존에 사방시설이 설치된 현장을 대상으로 개발된 프로그램을 적용함으로써 기존 사방시설의 적합성을 검토하였다. 대상지역은 강원도 인제군 인제읍 일대의 토석류 산사태 발생현장을 선정하였다. 대상현장은 강원도 인제군 인제읍 덕산리 일대 1개의 수계로서 2006년 7월 발생한 집중호우로 인하여 토석류 산사태가 발생된 현장이다. 산사태 발생시 최대강우강도는 62 mm/h이고, 당일 누적강우량은 227 mm으로 조사되었다. Fig. 2는 연구대상지역을 나타낸 것으로 시점부에서 2개의 산사태가 발생되어 계곡부에서 합쳐졌으며, 이후 하

Fig. 3. Location of debris barriers.

부로 사태물질이 흘러내린 토석류 산사태이다. 현장조사 결과 대상지역의 경우 4개의 사방댐이 계곡의 중하류부에 설치되어 있는 것으로 나타났다. 특히 하류부에는 1개의 대형 슬릿댐과 콘크리트 사방댐이 설치되어 있었다. Fig. 3은 대상지역에 설치되어 있는 사방댐의 위치를 나타낸 것이다.

토질시험 및 입력인자 선정

대상지역 토질의 물리적 특성을 파악하고 해석프로그램을 위한 입력자료로 활용하기 위하여 연구대상지역인 인제군 덕산리 일대 3개소에서 토층시료를 채취하였다. Fig. 4는 각 연구대상지역의 시료채취위치를 나타낸 것이다. 시료는 연구지역에 분포하고 있는 지형조건 및 토층분포 등을 고려하여 토층의 특성이 균등하게 반영될 수 있도록 채취하였다. 원지반의 토층시료는 표토를 제

Table 1. Determination of input data

Content	S1-1	S1-2	S1-3
Total unit weight (t/m^3)	1.322	1.756	1.769
Porosity (%)	31.69	34.09	32.74
Soil depth (m)	2	2	1
Cohesion (kPa)	9.3		
Internal frictional angle ($^\circ$)	34.6		
Saturated hydraulic conductivity (m/h)	0.0168 (Kim, 2006)

Fig. 4. Location of soil sample.

거한 후 40~60 cm 정도의 깊이에서 채취하였는데, 불교란 시료는 스테인레스로 제작된 원통형 샘플러를 이용하여 채취하였으며, 교란시료는 비닐팩을 사용하였다. 모든 시료는 현장조건이 최대한 유지되도록 밀봉한 상태로 실험실로 운반하였다. 그리고 채취한 토층시료를 이용하여 비중, 함수비, 액성한계 및 소성한계, 입도분석 등의 물성시험을 실시하고, 실내 밀도시험을 통해 건조 및 습윤단위중량을 산정하였으며, 직접전단시험을 실시하여 연구지역 토층의 강도정수를 구하였다. 제반 토질 시험방법은 KS의 관련기준에 준하여 실시하였다.

연구대상지역에 대한 토질시험결과 습윤단위중량은 1.322~1.769 t/m^3 이며, 함수비는 약 12~20%인 것으로 나타났다. 그리고 입도분석시험결과 실트질 혹은 점토질 모래의 성분이 우세한 것으로 조사되었다. 또한 직접전단시험결과 점착력은 9.3 kPa이고 내부마찰각은 34.6°인 것으로 나타났다. 이와 같은 토질시험결과를 토대로 개발된 프로그램의 입력자료를 선정하였다. 그리고 토층심도는 현장조사시 시료채취위치에서 측정하였으며, 포화 투수계수는 기존에 수행된 유사한 토층에서의 시험결과 (Kim, 2006)를 적용하였다. Table 1은 본 프로그램의 입력자료를 선정한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 5. Digital topographic map. **Fig. 6.** Results of TIN analysis.

해석결과

연구지역을 대상으로 토석류 산사태 발생위치와 토석류 누적구간을 계산하고, 이를 토대로 기존 설치된 사방댐의 적정성을 평가하였다. Fig. 5는 해석프로그램에서 대상지역의 수치지형도를 이용하여 지형자료로 변환한 것이다. 그리고 Fig. 6은 입력된 지형자료를 토대로 TIN을 생성하여 대상지역의 고도와 사면경사를 분석한 결과이다. Fig. 7(a)은 등고선 정보를 가지고 있는 지형자료를 이용하여 DEM을 생성한 결과이다. DEM은 본 해석프로그램에서 사용하는 가장 기본적인 자료이다. 본 해석프로그램에서 한 개의 cell의 크기는 10 m × 10 m를

(a) DEM generation

(a) Slope angle

(b) DEM correction

(b) Slope direction

Fig. 7. Results of DEM generation.

Fig. 9. Determination of slope angle and direction.

Fig. 8. Determination of flow direction.

Fig. 10. Determining accumulated flow.

적용하였다. Fig. 7(b)는 생성된 DEM을 보정한 결과를 나타낸 것으로 보정작업을 통하여 함몰지형을 제거할 수 있다. 이를 통하여 분석시 오류를 유발시키는 지형을 제거한다. Fig. 8은 보정된 DEM정보와 D8 알고리즘(O'Callaghan and Mark, 1984)을 이용하여 흐름방향을 결정한 것이다. D8 알고리즘은 3×3 크기의 cell에서 가운데에 위치한 cell의 흐름방향을 결정하기 위해서 주

변 8개 cell과의 중심점 거리와 고도차를 이용하며, 이를 통해서 계산된 경사 중 가장 급한 하향경사의 방향으로 흐름방향을 결정하는 방법이다. Fig. 9(a)는 삼각망을 이용하여 각 셀의 사면경사를 결정한 것이며, Fig. 9(b)는 각 셀의 사면경사를 토대로 각 셀의 사면방향을 결정한 것이다. Fig. 10은 흐름방향을 이용하여 각 셀의 누적흐름을 결정한 것이다. 그리고 Fig. 11은 연구대상

Fig. 11. Selecting area.

Fig. 14. Input of soil properties.

Fig. 12. Determination of trajectory.

Fig. 15. Interpolation of soil properties.

Fig. 13. Information of flow line.

Fig. 16. Determination of high potential probability of landslides.

지역의 대상 수계에 대하여 관심영역을 지정한 것이며, 흐름방향을 이용하여 결정된 분수령도 함께 나타낸 것이다.

Fig. 12는 연구대상지역의 대상 수계에 대한 관심영역을 대상으로 이동경로를 선정한 것이다. 이동경로를 결정하기 위해서는 누적흐름정보가 필요하다. 즉 각 셀에 기록된 누적흐름의 개수를 기준으로 이동경로를 결정하는 것이다. 그리고 Fig. 13은 관심영역내 이동경로와 함께 흐름선을 벡터의 형식으로 나타낸 것이다.

Fig. 14는 대상지역내에 시료를 채취한 위치와 토질시험결과로 구한 토질물성관련 자료를 입력한 것이다. 그리고 Fig. 15는 측정된 습윤단위중량, 공극률, 토중수심도 등을 이용하여 주변지역에 대한 정보를 구하기 위하여 보간법을 적용한 결과이다. Fig. 16은 대상지역에 대하여 사면안전율을 모두 계산한 후 파괴시 사면안전율을 1.5라고 할 때 위험지역을 나타낸 것이다. Fig. 17은 관심영역인 해당 수계를 대상으로 누적토석류량을 해석한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 17. Calculation of debris flow amount.

Fig. 18. Determination of the influence area of a debris barrier.

Fig. 19. Calculation of debris flow amount after installing a debris barrier.

Fig. 18은 현장조사를 통하여 구한 사방댐의 위치와 규모를 입력하여 사방댐의 영향범위를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 해당 수계에 대한 위치별 누적토석류량을 계산할 수 있으므로, 사방댐의 위치와 용량을 산정할 수 있다. Fig. 19는 사방댐이 설치된 이후 관심영역인 해당 수계에 대한 누적토석류량을 재해석한 결과이다. 누적토석류량은 이동경로를 따라 계산되며, 사방댐 적용시 사방댐에 퇴적되는 토석류량은 제외되고 누적토석류량이 계산된다. 해석결과 사방댐 적용시에도 누적토

석류량이 감소하지 않고 있으며, 설치전과 유사한 누적토석류량을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 현재 설치된 사방댐은 계산된 누적토석류량에 비해 비교적 부족하게 설치된 것으로 판단된다.

요약 및 결론

본 연구에서는 자연사면에서 발생하는 토석류 산사태의 발생을 예측하고 이에 대한 피해범위를 산정하여 산사태 대응공법의 위치와 규모를 산정할 수 있는 토석류 산사태 대응공법 설계 프로그램(CDFlow)을 개발하였다. 본 프로그램은 지리정보시스템의 개발도구 중에 하나인 ArcGIS를 이용하여 개발하였다. 산사태 발생을 예측하기 위하여 유사동역학적 슬립지수와 무한사면 안정해석식을 적용하였다. 여기서 산정된 사면안전율과 기준안전율을 비교하여 산사태 발생 위험지역을 표현할 수 있다. 산사태 발생 위험지역과 토층의 깊이를 이용하여 발생할 수 있는 토석류의 양을 산정하고, 이동경로에 따라 발생하는 누적토석류량을 산정한다. 또한 본 연구에서는 개발된 프로그램의 적용성을 평가하기 위하여 실제 산사태 발생지역을 대상으로 해석을 수행하였다. 연구대상 지역은 강원도 인제군 인제읍 덕산리 일대 1개 수계로서 4개의 대형 사방댐이 설치되어 있다. 대상지역에 대한 토질시험 및 현장조사결과를 이용하여 대상지역에 대한 토석류 산사태 발생위험지역과 토석류 이동경로를 산정하였다. 이동경로를 따라 사방댐 설치전후에 대한 누적토석류량을 계산하였으며, 이를 비교하였다. 비교결과 사방댐 적용시에도 누적토석류량이 감소하지 않고 있으며, 설치전과 유사한 누적토석류량을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 현재 설치된 사방댐은 계산된 누적토석류량에 비해 비교적 부족하게 설치된 것으로 판단된다. 따라서 본 프로그램을 이용하여 토석류 산사태의 발생가능성을 평가할 수 있으며, 발생시 토석류량을 산정할 수 있으므로 이를 토대로 토석류 산사태 대응공법의 설치위치와 규모를 합리적으로 산정할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “땡산개발에 따른 지질환경재해 확산제어 기술 개발(13-3212)”과 교육과학기술부 공공복지안전기술개발사업인 “극한강우 산사태 입체 모니터링을 통한 산사태 예경보 기술연구(2012M3A2A1050983)” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Chae, B. G., Kim, M. I., and Song, Y. S., 2011, Method for infinite slope stability analysis considering saturation depth ratio of rainfall, Patent Number 10-1078297, The Korean Intellectual Property Office. (In Korean with English abstract)
- Chae, B. G., Lee, S. H., Song, Y. S., Cho, Y. C., and Seo, Y. S., 2007, Characterization on the relationships among rainfall intensity, slope angle and pore water pressure by a flume test: in case of gneissic weathered soil, The Journal of Engineering Geology, 17(1), 57-64. (In Korean with English abstract)
- Kim, K. S., 2006, Soil characteristics according to the geological condition of soil slopes in landslide area, The Journal of Engineering Geology, 16(4), 359-371. (In Korean with English abstract)
- Kim, K. S., Song, Y. S., Cho, Y. C., Kim, W. Y., and Jeong, G. C., 2006, Characteristics of rainfall and landslides according to the geological condition, The Journal of Engineering Geology, 16(2) 189-199. (In Korean with English abstract)
- O'Callaghan, J. F. and Mark, D. M., 1984, The extraction of drainage networks from digital elevation data, Computer Vision, Graphics and Image Processing, 28, 328-344.
- Park, D. G., Oh, J. L., and Park, J. H., 2006, Geohazards and disaster prevention policy in Korea, Proc. 2006 Engineering Geology Symposium, Daejeon, 41-49. (In Korean with English abstract)
- Song, Y. S., Chae, B. G., and Seo, Y. S., 2007, Proposal of method to estimate the runout distance of landslides induced by rainfall, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 27(5C), 343-352. (In Korean with English abstract)
- Song, Y. S., Cho, Y. C., and Chae, B. G., 2011, A study on the commercialization of the design program for countermeasure against landslides, JP2011-004-2011(a), Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources. 69p. (In Korean with English abstract)
- Song, Y. S. and Hong, W. P., 2007, A case study on the analysis of cause and characteristics of a landslide at the sedimentary rock area, The Journal of Engineering Geology, 17(1), 125-133. (In Korean with English abstract)
- Song, Y. S. and Hong, W. P., 2011, Analysis of slope stability with consideration of the wetting front and groundwater level during rainfall, The Journal of Engineering Geology, 21(1), 25-34. (In Korean with English abstract)
- Song, Y. S., Hong, W. P., and Woo, K. S., 2012, Behavior and analysis of stabilizing piles installed in a cut slope during heavy rainfall, Engineering Geology, 129, 56-67.
- Song, Y. S., Jang, Y. H., and Kim, J. S., 2005, Landslide characteristics induced by heavy rainfall in Samcheok area, The Journal of Engineering Geology, 15(4), 435-445. (In Korean with English abstract)

원고접수일 : 2013년 2월 22일

수정본채택 : 2013년 3월 14일

게재확정일 : 2013년 3월 18일

송영석

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

305-350, 대전광역시 유성구 과학로 124

Tel: 042-868-3035

e-mail: yssong@kigam.re.kr

채병곤

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

305-350, 대전광역시 유성구 과학로 124

Tel: 042-868-3052

e-mail: bgchae@kigam.re.kr