

## A Study on the Debris Flow Movement and the Run-out Calculation Using the Coupling of Flood Runoff Model and Debris Flow Model

Dong Ho Nam<sup>#</sup>, Suk Ho Lee, Kye Won Jun, Byung Sik Kim<sup>+</sup>

Department of Urban & Environmental Disaster Prevention School of Disaster Prevention, Kangwon National University, 346 Joogang-ro, Smacheok-si, Gangwon-do, Republic of Korea

### Abstract

An increasing amount of damage results from debris flow in urban areas and mountainous regions covering most of the lands in Korea. It is believed that the analysis of the rainfall that gave rise to debris flow needs to be preceded in order to reduce damage from mudslide. The Spatial Runoff Assessment Tool (S-RAT) model, a distribution-type rainfall-runoff model, was adopted to analyze the rainfall causing debris flow. In order to estimate debris flow expansion, the couple modeling was performed using the Rapid Mass Move Simulation (RAMMS) model, a two-dimensional numerical analysis model for debris flow. In addition, for the correction of the aerial images on actual areas damaged by earth and sand, the optimal parameters were estimated by the NSI method, including sediment concentration ( $C_v$ ), flow velocity ( $V$ ), viscosity-friction coefficient ( $\mu$ ), and turbulent friction factor ( $\xi$ ). The result showed that the frequency of the actual rainfall causing the Umyeonsan landslide was more than 200 years, and the damaged area around the Raemian apartment was simulated as 65,430  $m^2$ , with the frequency of 200 years.

**Key words:** debris flow, rainfall, S-RAT, RAMMS, couple modeling, run-out range

### 1. 서론

#### 1. 연구 배경 및 목적

최근 전 세계적인 기후변화에 따른 국지성 집중호우 및 태풍으로 인한 피해가 지속적으로 발생하고 있으며, 이에 따른 토석류로 인한 2차 피해 또한 크게 발생하고 있다. 우리나라는 국토의 64% 가량이 산지로 이루어져 있고 도심과 인접한 산지지역에서의 토석류로 인한 피

해 또한 급증하고 있는 추세이다. 기상청 자료에 따르면 1973년부터 2008년까지의 전국 60개 관측강우자료를 분석한 결과 1시간 강수량 50mm 이상 발생횟수는 1970년대 7.1회에서 2000년대 18.0회로 지난 30년간 2배 이상 증가하였고, 2000년 이전 여름철 평균 강수량이 670mm에서 2001년 이후 844mm로 21%가 증가한 것으로 나타났다(Korea Meteorological Administration, 2010). 즉, 기후변화의 직접적인 영향인 강우의 증가로

<sup>#</sup> The 1st author: Dong Ho Nam, Tel. +82-33-570-6838, Fax. +82-33-570-6469, e-mail. [skaehdghkk@kangwon.ac.kr](mailto:skaehdghkk@kangwon.ac.kr)

<sup>+</sup> Corresponding author: Byung Sik Kim, Tel. +82-33-570-6819, e-mail. [hydrokbs@kangwon.ac.kr](mailto:hydrokbs@kangwon.ac.kr)

인하여 간접적인 영향인 토사재해 또한 빈번하게 발생하고 있다. 2000년대 들어서 대규모 태풍 ‘루사’와 ‘매미’ 등으로 인해 그리고 2006년 우리나라 중부지방의 집중호우로 인한 토석류 피해, 2011년 7월 집중호우로 인해 서울시 서초구에 위치한 우면산 일대에서 수십여 곳이 동시 다발적으로 많은 토석류가 발생하였고 춘천 마적산에서 또한 많은 토석류가 발생하여 막대한 인명과 재산 피해를 유발시켰다. 규모면에서 보다 큰 토석류가 이전에도 강원지역 등에서 발생하였음에도 불구하고 우면산 토석류 피해가 사회적 관심을 크게 불러일으킨 것은 서울 도심지에서 발생하여 이로 인하여 많은 인명과 재산 피해가 발생하였기 때문이다. 우리나라는 외국에 비해 토석류에 대한 선행연구가 많지 않아 토석류로 인한 위협에 크게 노출되어 있다. 이러한 토석류 피해를 저감하기 위해서는 토석류가 어디서 발생할지를 예측하고, 발생한 토석류가 어떻게 이동하여 하류부에 피해를 주는지 예측하여야 하며, 토석류를 유발시키는 강우의 해석이 우선시 되어야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 2011년 서울시 우면산 산사태 피해지역인 래미안 아파트 일대를 대상으로 토석류를 유발하는 강우를 빈도별로 해석하고 토사량을 산정하여 빈도별에 따른 확산면적을 산정하였다.

## 2. 연구동향

토사유출량을 산정하는데 앞서 실무자들은 대부분 토석류를 유발하는 유량을 산정하고자 합리식을 이용하여 산정하였으나, 본 논문에서는 강우-유출모형을 통하여 유역의 특성을 고려하고 유역 전체에서의 유출량이 아닌 토사피해를 유발시키는(상류 및 토석류 발생 지역) 강우의 유출량을 산정하기 위하여 강우-유출모형을 이용하여 토사량을 산정하였고 RAMMS 모형에 적용하여 확산면적과 확산범위를 산정하였다.

국내에서는 2006년 토석류 피해가 발생한 이후부터 본격적인 토석류에 관련된 연구가 시작되었다. Kim(2011)은 지상 LiDAR를 이용하여 토석류 발생지역에서의 DEM을 추출하여 토석류 수치모형인 FLO-2D

모형에 적용하여 토석류 피해범위를 산정하였고, Oh, *et. al.*(2013)은 SINMAP과 FLO-2D를 이용하여 토석류 피해 위험 지역을 정량적으로 분석할 수 있는 방법을 제안하여 토석류피해 위험지역의 범위를 분석하고 제 공함으로써 인명과 재산 피해를 줄이기 위한 방재계획 수립에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대했다. Kim, *et. al.*(2013)은 우면산 토석류 피해에 대해서 FLO-2D모형을 적용하여 모형의 적합성을 평가하였으며, Oh(2013)는 강우기준을 활용한 산사태 발생에 대한 시간적 예측과 함께 공간적 취약성을 동시에 고려할 수 있는 방안을 제시하였고, Kim, *et. al.*(2015)은 실제 지역에서의 토석류의 유동형태를 파악하고, 외력조건으로 DAD 분석을 통해 가능최대강수량과 유출량을 산정하여 주거지 지역에서의 토석류 영향범위를 파악하였다. 또한 Tak(2015)은 지상 LiDAR를 이용하여 현장 측정을 통해 실제 토석류 피해범위를 산정하여 지형자료를 구축하였으며, RAMMS 모형에 적용하여 토석류의 이동과 확산범위를 산정하였다.

국외 연구사례로는 Bertolo & Wiczorek(2005)은 미국 캘리포니아주의 Yosemite 계곡에 1차원 모델인 DAN(Dynamic ANalysis)과 FLO-2D를 적용하여 연구 지역에서 관찰된 토석류의 유출거리와 속도를 비교분석하였다. Cesca & Agostino(2008)는 토석류 해석 모형인 RAMMS 모형과 FLO-2D모형을 같은 매개 변수를 사용하여 이탈리아 북부지역 Dolomite 산맥에 적용하였고, Lin, *et. al.*(2011)은 FLO-2D를 이용하여 2004년 태풍 민들레(Mindulle)로 인한 대만 Song-Her 지역에서 발생한 토석류를 모의하였으며, 연구를 통해 조도 계수가 증가하면 토석류의 이동거리가 감소하고, 최대 퇴적 깊이가 증가하면 흐름과정 동안 토석류의 속도가 감소한다는 것을 나타냈다. Hussin, *et. al.*(2012)은 RAMMS 모형을 Southern French에 적용하여 모형의 민감도 분석 및 유출량, 유동심, 유속 등을 해석하였다.

## 3. 연구방법

연구절차를 개념도 및 흐름도로 정리하면 <Figure

1)과 <Figure 2>와 같다. 실제 토석류를 발생시킨 강우를 S-RAT모형에 적용하였고 침투홍수량과 유출총량을 산정하였으며, 일본 국토교통성에서 제시한 토사량 산정식에 근거 토사량을 산정하였다(Kim, 2011). 산정된 침투홍수량과 토사량을 RAMMS모형에 적용하여 확산면적을 산정하였으며, 피해 후의 항공영상사진의 확산면적에 검·보정을 위하여 정량지수 산정방법을 이용하여 최적의 토사농도(Cv) 및 유속(V), 점성마찰계수(Mu), 난류마찰계수(Xi)를 산정하였다. 또한 빈도별에 따른 확산면적을 분석하고자 빈도별 확률강우량(30년, 50년, 100년, 200년)을 산정하였으며, 2000년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서의 가능최대강수량

(PMP)을 사용하여 분석하였다.

## II. 이론적 배경

### 1. 분포형 강우-유출모형 S-RAT

(Spatial Runoff Assessment Tool)

S-RAT(Spatial Runoff Assessment Tool)모형은 Kim, *et. al.*(2010)이 개발한 분포형 강우-유출모형으로 GIS자료를 이용하여 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고 각각의 격자마다 시간간격별 개념적 물수지를 계산함으로써 유역의 시·공간적 유출량 변화를 모의하도록 설계되었다. 또한 대부분의 분포형 수문모

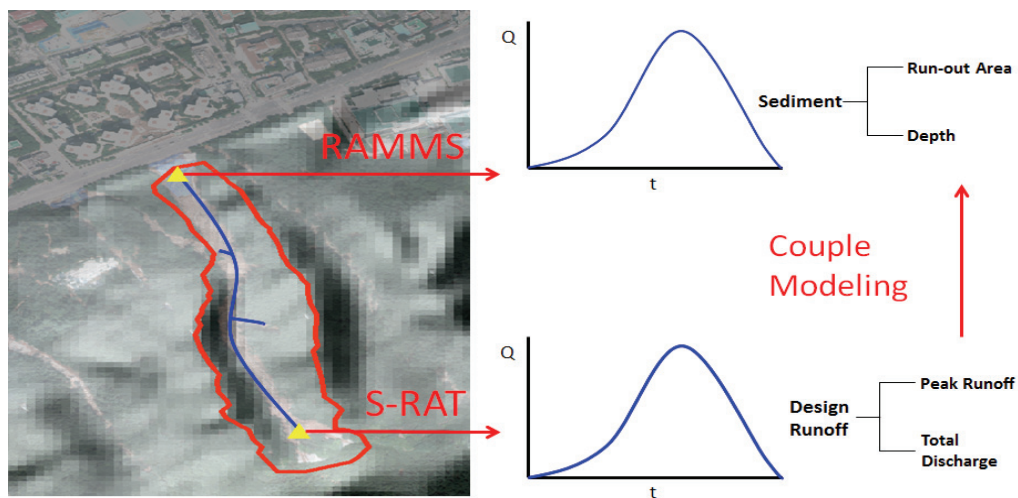


Figure 1. Coupling concept

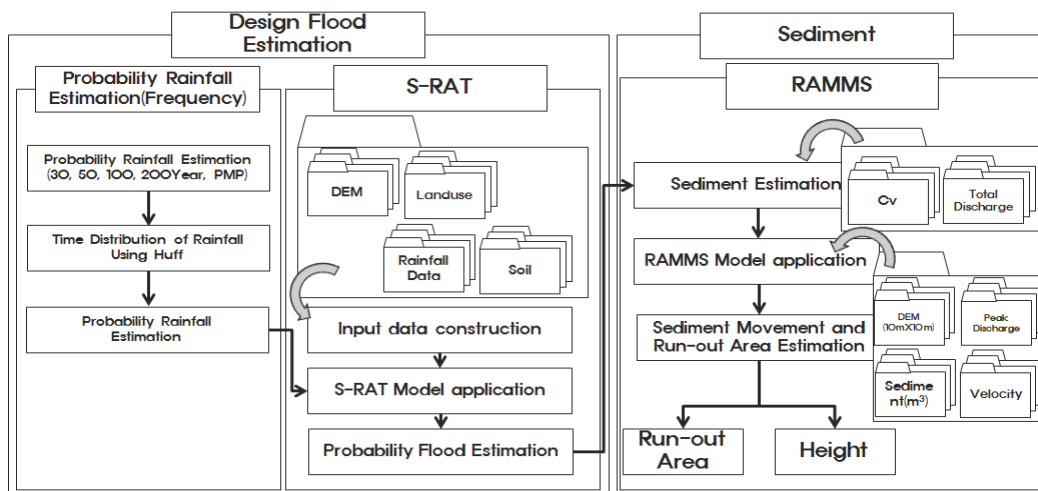


Figure 2. Flowchart of study

형들은 모형에 입력될 지형학적 매개변수들을 추출하기 위해 Arc 관련 소프트웨어 또는 IDRISH 등과 같은 GIS 관련 상용패키지에 의존하나 S-RAT은 자체적으로 매개변수를 추출하여 입력자료가 간소화 되어 있다. S-RAT모형에 대한 자세한 내용은 Kim, *et. al.*(2010)의 “격자기반의 개념적 수문모형의 개발” 논문을 참조하기 바란다.

## 2. 토석류 2차원 수치모형 RAMMS (Rapid Mass Move Simulation)

RAMMS모형은 스위스 눈사태 기관인 SLF(Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research)의 WSL(Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee Und Landschaft)팀에서 개발되었고 Dynamic modeling으로 토석류(Debris flow), 낙석(rockfall), 눈사태(Avalanches)의 세 가지 모듈을 수치표고모형(DEM)에서 분석이 가능하도록 구성되어 있다. 모형의 기본방정식은 Vollemy-salm의 접근 방법에 기초하고 식 (1)과 같이 표현된다.

$$S = \mu N + (1 - \mu) C - (1 - \mu) C \exp\left(-\frac{N}{C}\right) + \frac{\rho g U^2}{\xi} \quad (1)$$

여기서 S는 마찰력, C는 유동물질에 대한 응집력,  $\mu$ 는 dry-coulomb type friction coefficient, g는 중력 가속도,  $\rho$ 는 밀도, U는 유속, N은 활동면에 대한 수직 응력을 의미한다. C는 응집력을 가지고 있는 흐름 물질로, N=0, U=0의 조건일 때 마찰력 S는 0이 된다. C의 값이 증가하면 마찰력은 증가하게 되고 이에 전단응력이 증가하게 된다. 이에 토석류나 눈사태의 흐름이 약해지는 현상이 일어난다.

## 3. 토사량 산정

RAMMS 모형에는 토사량, 침투홍수량, 유속 및 수치표고모형(DEM)이 필요하다. 유출총량과 침투홍수량

은 앞서 강우-유출모형 S-RAT에서 산정하였다. 토사량은 유출총량을 사용하여 일본 국토교통성에서 제시한 토사농도계수에 따른 토사량 산정식(2)를 사용하여 산정하였으며, 토사농도는 실험을 통하여 0.4의 Mudflow라는 결과를 얻었으나, 토사농도에 따른 변화 및 검증 을 위해 정량지수를 산정하여 최적의 토사농도를 산정하였다. 유속의 경우 산정식을 찾기 어려워 매개변수로 활용하여 토사농도와 동일한 방법으로 최적의 유속을 산정하였고, 마찰력과 항복응력 또한 동일한 방법으로 산정하였다. 또한 수치표고모형(DEM)은 고해상도의 10m × 10m의 자료를 사용하였다.

$$C_V(\text{토사농도}) = \frac{\text{토사량}(m^3)}{\text{유출총량}(m^3/sec) + \text{토사량}(m^3)} \quad (2)$$

## 4. 정량지수 산정

정량지수는 <Figure 3>과 같이 정의되며, 성공지수(Success index), 오류지수(Error index) 및 순 성공지수(Net success index)로 구성된다. 성공지수는 식(3)과 같이 조사결과에서 얻어진 토석류 재해 영향범위( $A_{affected}$ )에 해석결과가 포함된 면적( $A_{coincide}$ )비율을 나타낸다. 오류 지수는 식(4)와 조사된 토석류 재해 영향 범위에 대한 불일치된 해석결과 면적( $A_{error}$ )의 비율을 나타낸다. 여기서  $A_{error}$ 는 조사된 영향범위에 불일치된 해석결과( $A_{error-A}$ )와 조사결과에서 얻어진 토석류 재해 영향범위에 포함되지 않은 면적( $A_{error-B}$ )의 합이다. 그리고 순 성공지수(Net success index)는 식(5)와 같이 성공지수에서 오류지수를 뺀 값으로서 해석결과의 정확도를 나타내는 지수이다(Kang & Kim, 2015). 본 연구에서는 이러한 방법을 이용하여 토사농도, 유속, 점성마찰계수, 난류마찰계수를 사용하여 실제 토사가 발생한 피해범위와 RAMMS 모형의 결과를 비교 및 분석하여 성공지수(SI), 오차지수(EI), 순 성공지수(NSI)를 산정하였다.

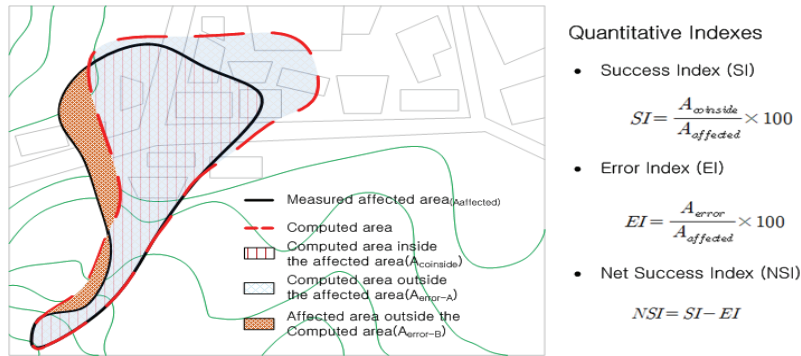


Figure 3. Definition of quantitative indexes

$$SI(\%) = \frac{A_{coinside}}{A_{affected}} \times 100 \quad (3)$$

$$EI(\%) = \frac{A_{error}}{A_{affected}} \times 100 \quad (4)$$

$$NSI(\%) = SI - EI \quad (5)$$

### III. 적용 및 결과

#### 1. 대상구역의 선정

서울 서초구 우면산 산사태 피해지역인 래미안 아파

트 일대를 대상으로 선정하였으며, 유역 면적은 75,600m<sup>2</sup>, 평균경사는 44°이다. 2011년 7월 27일 발생한 우면산 산사태는 00시~09시까지의 누적강우량을 살펴보면 서초 218mm, 강남구 318mm, 관악구 348mm, 남현 358mm로 많은 양의 강우가 발생하였다. <Table 1>은 우면산 주변의 AWS 강우관측소의 현황을 나타냈으며, <Figure 4>는 래미안 아파트 일대의 토석류 피해를 항공영상사진 상의 피해 전·후 영상으로 나타냈다.

Table 1. Information of AWS weather station

Name	Address	TM		Altitude(m)
		X Coordinates	Y Coordinates	
Gangnam ①	Gangnam-gu, Seoul	202691,618481	444510,504202	59.6
Sucho ②	Sucho-gu, Seoul	199744,399711	442660,489416	35.5
Namhyeon ③	Gwanak-gu, Seoul	198269,723198	438961,513897	87.1
Gwanak ④	Gwanak-gu, Seoul	195320,597045	438962,647642	145.1

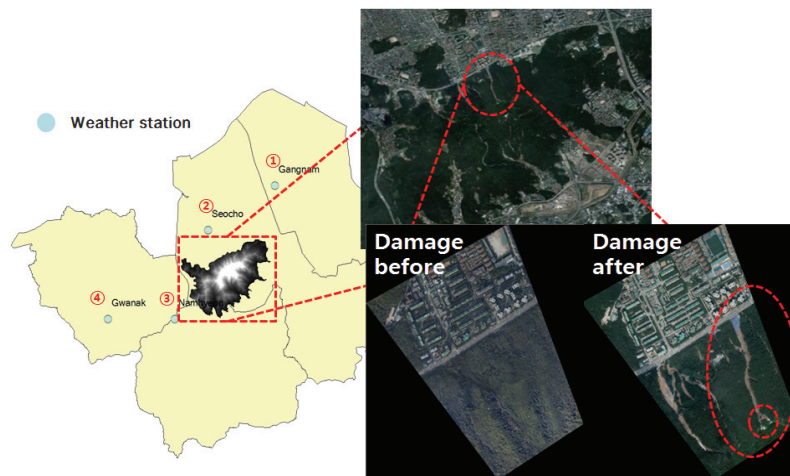
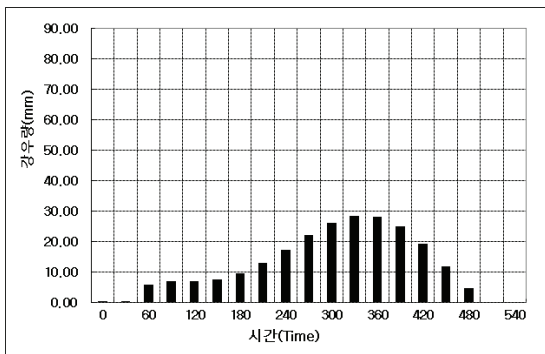


Figure 4. Study area

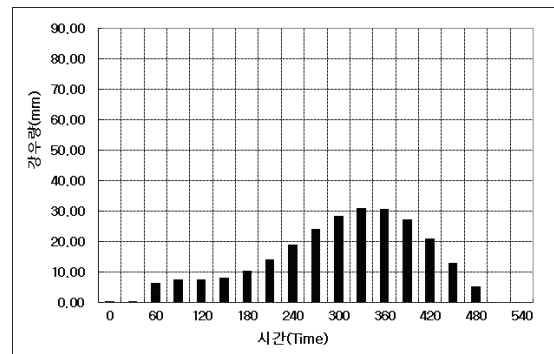
2. 강우 분석

서울시 1961년~2014년까지 총 55년의 시간단위 강우자료를 수집하여 극치분포(GEV)의 빈도별 확률강우량(30년, 50년, 100년, 200년)을 산정하고, 2000년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서(Ministry of Construction and Transportation, 2000)에서 제시한 한국 가능최대강수량(PMP)을 사용하였다. 또한 <Figure 5>는 Huff 3분위법을 이용하여 지속시간 9시간 빈도별 확률강우량과 가능최대강수량(PMP)을 시간분포 시킨 결과를 나타낸 것이다.

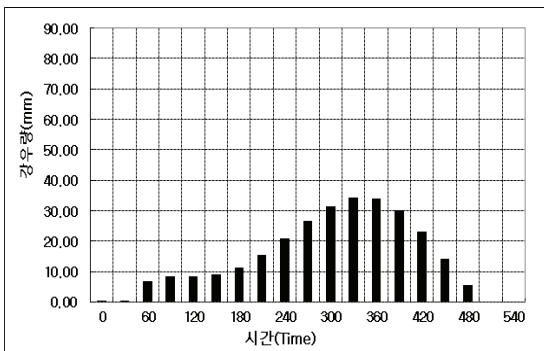
3. S-RAT 모형을 이용한 토석류 유발 홍수량 산정  
S-RAT모형을 이용하여 토석류 유발 홍수량을 산정하기 위해서는 수치표고모형(DEM), 토지이용도(Landuse), 토양도(Soil) 3가지의 지형자료와 강우자료가 필요하다. 10m X 10m 고해상도 수치표고모형(DEM)을 사용하기 위해 1:25,000의 우면산 수치지도에서 GIS Tool을 이용하여 유역분석을 실시하고 래미안 아파트 피해지역의 유역만을 사용하였다. 토지이용도(Landuse), 토양도(Soil)는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 자료를 사용하였다.



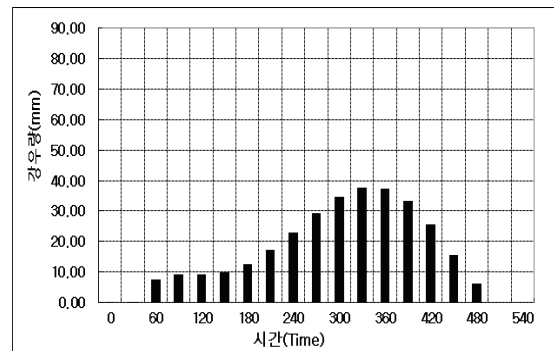
(a) 30Year



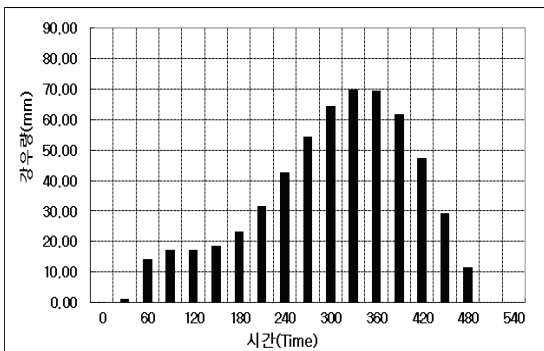
(b) 50Year



(c) 100Year



(d) 200Year



(e) Probable maximum precipitation(PMP)

Figure 5. Design hyetograph

또한 입력자료 입력 후 유출량을 산정하기 위하여 출구 점을 선정하여야 하며, 본 연구에서는 유역에서의 유출량이 아닌 토석류가 발생했을 때의 강우의 유출총량을 산정하여 토사량을 산정하기 위해 토석류가 발생한 지점에서의 출구점을 선정하여 유출총량을 산정하였다. <Figure 6>은 S-RAT 모형의 입력되는 지형자료를 나타냈으며, <Figure 7>은 S-RAT 모형의 입력자료를 나타냈다.

유출총량 산정 결과, 관측강우는 4,828.9m<sup>3</sup>/s로 나타났으며, 각 빈도별 유출총량은 30년 빈도 3,473m<sup>3</sup>/s, 50년 빈도 3,781.8m<sup>3</sup>/s, 100년 빈도 4,197.9m<sup>3</sup>/s, 200년 빈도 4,611.7m<sup>3</sup>/s, 가능최대강수량(PMP)은 8,554.7m<sup>3</sup>/s로 가장 큰 값을 나타냈으며, 실제 발생한 강우의 빈도는 200년 빈도 이상의 강우로 확인되었다. 또한 침투홍수량 산정결과로는 관측강우 0.58m<sup>3</sup>/s, 30년 빈도

0.24m<sup>3</sup>/s, 50년 빈도 0.26m<sup>3</sup>/s, 100년 빈도 0.28m<sup>3</sup>/s, 200년 빈도 0.32m<sup>3</sup>/s, 가능최대강수량(PMP)는 0.59m<sup>3</sup>/s로 침투홍수량 또한 가능최대강수량이 가장 크게 나타났으나 유출총량에 비해 침투홍수량은 관측강우와 가능최대강수량과 비슷한 값을 나타내었다.

#### 4. 정량지수를 이용한 최적의 매개변수 산정

토사농도(Cv)는 실험을 통하여 0.4의 결과를 얻었으나, 검증을 위하여 0.4~0.7까지 분석한 결과 성공지수(SI)는 농도계수의 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않으나, 오류지수(EI)의 경우 0.4 이상일 때 오류가 증가하는 경향을 나타냈으며, 순 성공지수(NSI)는 농도의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 유속(V)의 경우는 산정식을 찾기 어려워 매개변수로 사용하여 2~10m/s까지 분석하였다. 성공지수(SI)는 0~8m/s까

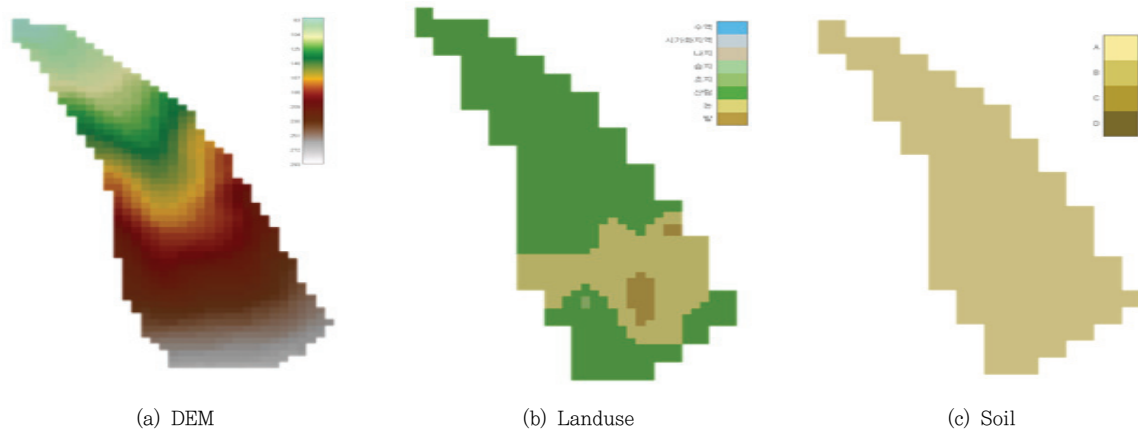


Figure 6. GIS input data for S-RAT

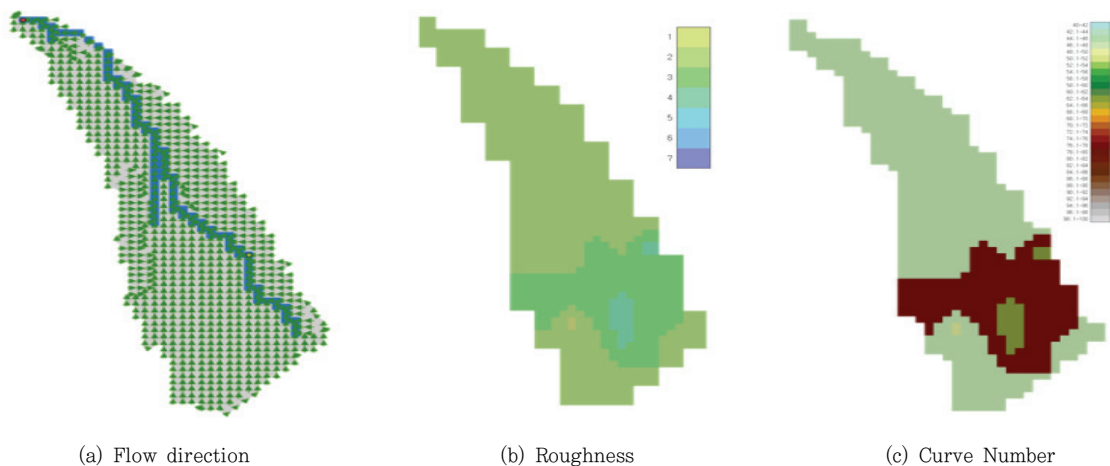


Figure 7. Parameter data for S-RAT

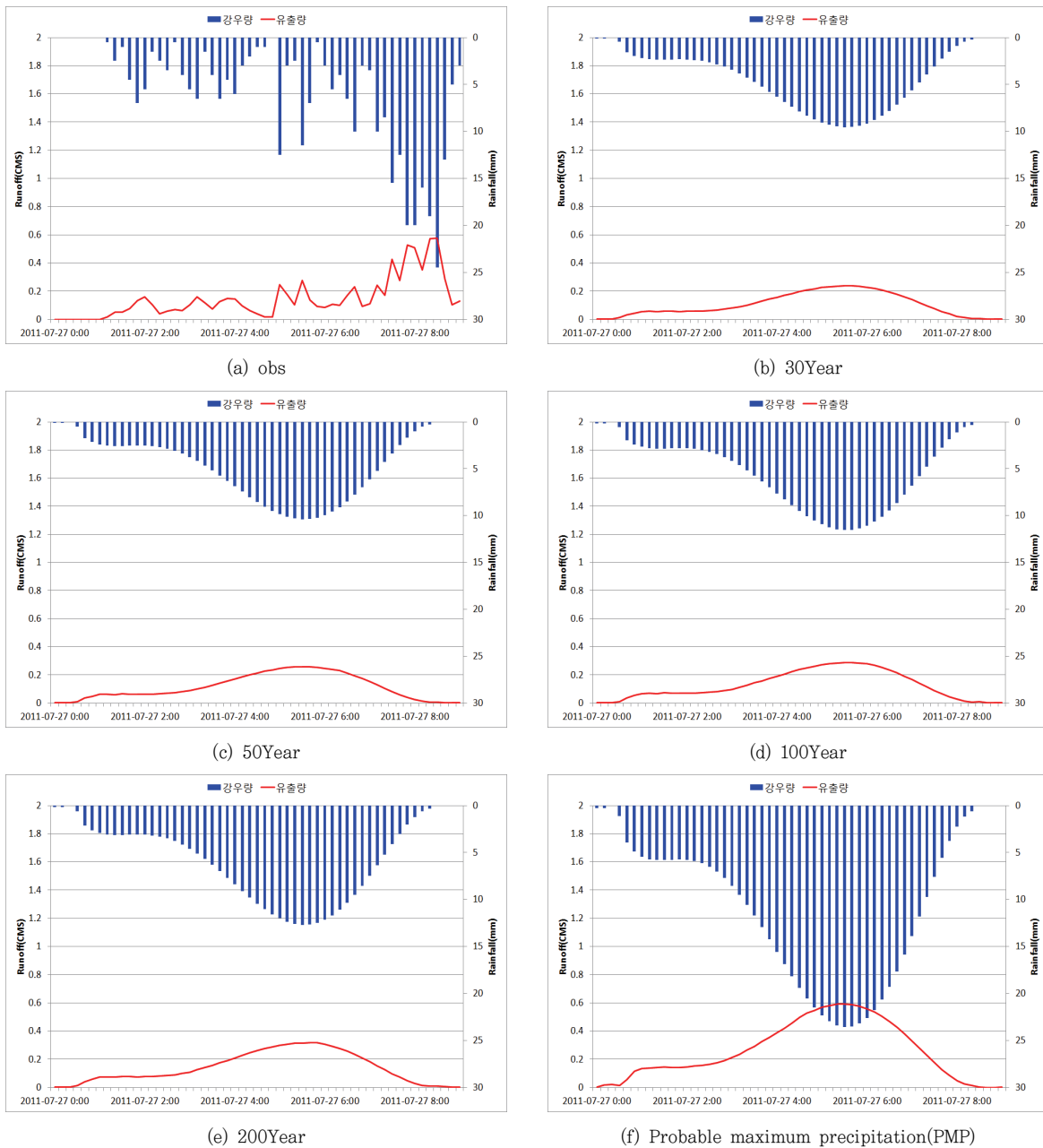


Figure 8. Hydrograph

지 비슷한 경향을 보이거나 8m/s 이상일 때 감소하는 경향을 보이며, 오류지수(EI)는 유속이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이거나 성공지수와 동일하게 8m/s 이상일 경우 증가하는 경향을 나타낸다. 순 성공지수(NSI)의 경우 유속이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이며 8m/s

이상일 때 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 점성마찰계수( $\mu$ ) 및 난류마찰계수( $\xi$ )의 경우 Voellmy-fluid friction식에 기초하며, 난류마찰계수의 범위는 <Table 2>와 같다(RAMMS User Manual). 점성마찰계수( $\mu$ )는 0.08 ~ 0.16까지 분석하였으며, 성공지수(SI)와 오

Table 2. Voellmy friction coefficient range (RAMMS user manual)

	Granular flow (solid-dominated)	Mud flow (fluid-like)
urbulent friction, $\xi(m/s^2)$	100-200	201-1,000

Table 3. Best fit parameter

Volumetric sediment concentration, Cv	Velocity, V(m/s)	Viscous friction, $\mu$	Urbulent friction, $\xi$ (m/s <sup>2</sup> )
0.4	8	0.1	950

류지수(EI)는 0.1까지 증가하는 경향을 보이거나 0.1이상 일 때 감소하는 경향을 나타내며 순 성공지수(NSI) 또한 0.1까지 큰 폭으로 증가하는 경향을 보이거나 0.1이상 일 때 감소하는 경향을 나타낸다. 난류마찰계수(Xi)는 200m/s<sup>2</sup> ~ 1,250m/s<sup>2</sup>까지 분석하였으나 600m/s<sup>2</sup>까지의 분석결과 동일한 결과를 나타내어 반영하지 않았으며, 650m/s<sup>2</sup> ~ 1,250m/s<sup>2</sup>의 분석결과 성공지수(SI) 경우 950m/s<sup>2</sup>까지 증가하는 경향을 보이거나 950m/s<sup>2</sup> 이상일 때 감소하는 경향을 나타내며 오류지수(EI)의 경우 1,050m/s<sup>2</sup>까지 감소하나 그 이상일 경우 증가하는 경향을 나타냈으며, 순 성공지수(NSI)는 950m/s<sup>2</sup>까지 증가하는 경향을 보이거나 그 이상일 때 감소하는 경향

을 나타냈다. 따라서 위 결과를 보면 매개변수에 따라 확산면적 및 범위가 변화하고 그에 비례하여 성공지수, 오류지수, 순 성공지수가 변화함을 알아볼 수 있었다. <Table 3>은 산정된 최적의 매개변수를 나타낸 표이며, <Figure 9>는 각 매개변수별 정량지수 그래프를 나타냈다.

5. RAMMS 모형을 이용한 토사유출모의

각 빈도별 토사량은 30년 빈도 1,354.5m<sup>3</sup>, 50년 빈도 1,474.9m<sup>3</sup>, 100년 빈도 1,637.2m<sup>3</sup>, 200년 빈도 1,798.6m<sup>3</sup>, 가능최대강수량(PMP)은 3,336.3m<sup>3</sup>으로 가장 많은 토사량을 보였으며, 토사유출모의 결과 확산

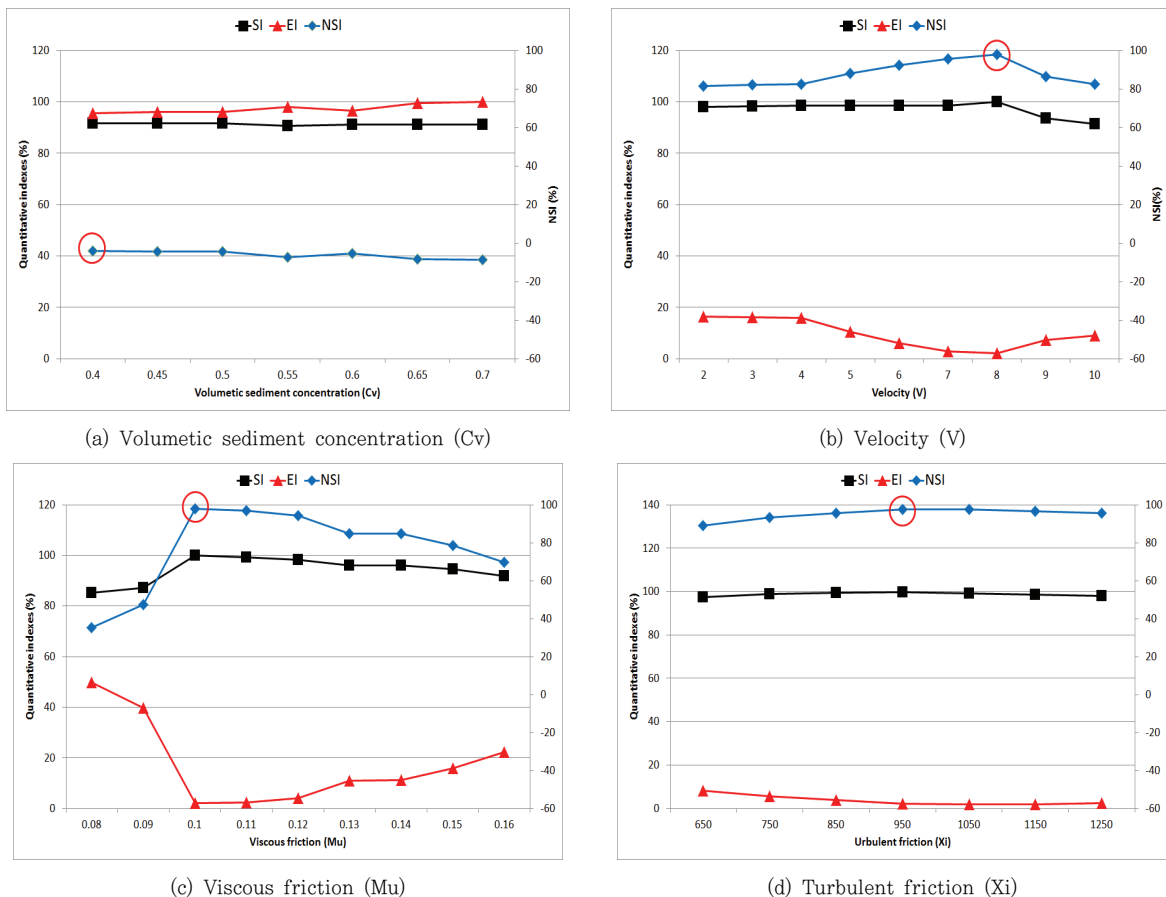


Figure 9. The quantitative indexes of with volumetric sediment concentration and velocity, viscous friction, urbulent friction

면적 또한 가능최대강수량(PMP)이 가장 넓은 확산면적을 나타냈다. 또한 확산범위 산정 결과 <Figure 11>과 같이 저지대의 경우 경사가 완만한 곳에서는 실제 토석류 보다 퍼짐 현상이 크게 나타나고 있으며, 확산면적의 경우 증가하는 강우에 비해 토사면적은 큰 차이를 나타내지 않았다. <Table 4>는 빈도별 토사피해 확산범위를 산정하여 나타냈다.

Table 4. Run-out area

Return period	Run-out area(m <sup>2</sup> )
Observation rainfall	65,430
30Year	34,112
50Year	43,903
100Year	47,015
200Year	50,446
Probable maximum precipitation(PMP)	77,022

#### IV. 결론

본 논문에서는 2011년 7월에 발생한 우면산 산사태 피해지역인 래미안 아파트 일대를 대상으로 실제 토석

류를 유발시킨 관측강우와 빈도별 확률강우량 및 가능최대강수량(PMP)을 분포형 강우-유출모형인 S-RAT에 적용하여 침투홍수량 및 유출총량을 산정하였다. 산정된 유출총량을 이용하여 토사량을 산정하였고, 토석류 2차원 수치모형인 RAMMS에 적용하였으며, 정량지수 산정방법을 이용하여 토사농도(Cv), 유속(V), 점성마찰계수(Mu), 난류마찰계수(Xi)에 대한 최적의 매개변수를 산정하여 대상구역의 확산면적 및 확산범위를 산정하였다.

강우-유출 결과 유출총량은 관측강우가 4,828.9m<sup>3</sup>/s, 30년 빈도 3,473m<sup>3</sup>/s, 50년 빈도 3,781.8m<sup>3</sup>/s, 100년 빈도 4,197.9m<sup>3</sup>/s, 200년 빈도 4,611.7m<sup>3</sup>/s, 가능최대강수량(PMP)은 8,554.7m<sup>3</sup>/s로 산정되었으며, 침투홍수량은 관측강우 0.58m<sup>3</sup>/s, 30년 빈도 0.24m<sup>3</sup>/s, 50년 빈도 0.26m<sup>3</sup>/s, 100년 빈도 0.28m<sup>3</sup>/s, 200년 빈도 0.32m<sup>3</sup>/s, 가능최대강수량(PMP)은 0.59m<sup>3</sup>/s로 산정되었다. 또한 산정된 유출총량을 토사농도계수에 따른 토사량 산정 결과 관측강우는 1,883.3m<sup>3</sup>, 30년 빈도 1,354.5m<sup>3</sup>, 50년 빈도 1,474.9m<sup>3</sup>, 100년 빈도 1,637.2m<sup>3</sup>, 200년 빈도 1,798.6m<sup>3</sup>, 가능최대강수량

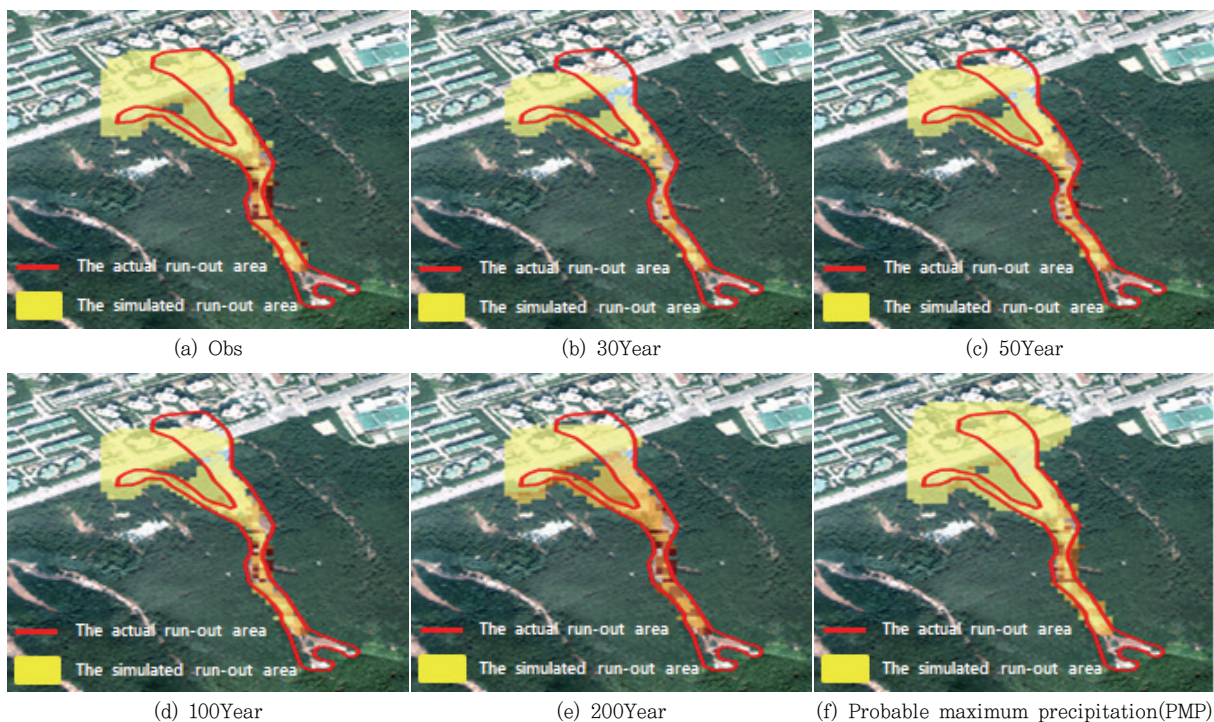


Figure 10. Run-out area

(PMP)은 3,336.3m<sup>3</sup>으로 산정되었고 유속은 10m/s로 산정하였다.

최적의 매개변수 산정결과 토사농도(Cv)는 0.4, 유속(V)은 8m/s, 점성마찰계수(Mu)는 0.1, 난류마찰계수(Xi)는 950m/s<sup>2</sup>로 산정되었다.

RAMMS 모형의 모의 결과는 관측강우의 확산면적은 65,430m<sup>2</sup>, 30년 빈도 34,112m<sup>2</sup>, 50년 빈도 43,903m<sup>2</sup>, 100년 빈도 47,015m<sup>2</sup>, 200년 빈도 50,446m<sup>2</sup>, 가능최대강수량(PMP)은 77,022m<sup>2</sup>로 산정되었으며 확산범위 결과 래미안 아파트 피해지역은 200년 빈도 이상의 강우가 발생하였다고 판단된다.

향후 연구에서는 확산 퍼짐에 대한 추가 연구와 토석류 발생지점의 위치와 RAMMS 모형의 매개변수를 보완하여 추가 연구를 수행코자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 국민안전처 자연재해저감기술개발사업단(자연재해예측및저감연구개발사업)의 지원으로 수행한 ‘풍수해 직접간접피해를 고려한 피해 산정 및 예측 기술개발’ [MPSS-자연-2015-79]과제의 성과입니다.

## References

Bertolo, P. and G. F. Wieczorek. 2005. Calibration of Numerical Models for Small Debris Flows in Yosemite Valley, California, USA. *Natural Hazard and Earth System Sciences*. 5: 993-1001.

Cesea, M. A. and V. Agostino. 2008. Comparison between Flo-2D and RAMMS in Debris Flow Modeling: A Case Study in the Dolomites, int. *Conference on Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris*. D. De Wrachien, C. A. Brebbia, and M. A. Lenzi(eds.).

Hussin, H. Y., B. Quan Luna, C. J. van Westen, M. Christen, J. P. Male, and Th. W. J. van Asch. 2012. Parameterization of a Numerical 2-D Debris Flow Model with Entrainment: A Case Study of the Faucon Catchment, Southern French

Alps. *Nat. Hazards Earth Syst.* 12: 3075-3090.

Kang, Hyo Sub and Yun Tae Kim. 2015. Study on Physical Vulnerability Curves of Buildings by Numerical Simulation of Debris Flow. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.* 15(5): 155-167.

Kim, Byung Sik, Seon Kyoo Yoon, Dong Min Yang, and Hyun Han Kwon. 2010. Development of Grid-Based Conceptual Hydrologic Model. *Journal of Korea Water Resources Association*. 43(7): 667-679.

Kim, Nam Gyun. 2011. A Study on Transport and Diffusion of Debris Flow with FLO-2D. Master's thesis. Kangwon National University.

Kim, Seung Eun, Joong Cheol Paik, and Kyung Suk Kim. 2013. Run-out Modeling of Debris Flows in Mt. Umyeon Using FLO-2D. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 33(3): 965-974.

Kim, Yeon Joong, Jung Sung Yoon, Tanaka Kohji, and Dong Soo Hur. 2015. Prediction of a Debris Flow Flooding Caused by Probable Maximum Precipitation. *Journal of Korea Water Resources Association*. 48(2): 115-126.

Korea Meteorological Administration. 2010. *Special Report Abnormal Climate*.

Lin, P. S., J. H. Lee, and C. W. Chang. 2011. An Application of the FLO-2D Model to Debris Flow Simulation - A Case of SONG-HER District in TAIWAN. *Proc. of 5th International Conference on Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. 947-956.

Ministry of Construction and Transportation. 2000. Report on the Development of Water Resources Management Techniques.

Oh, Jeong Rim. 2013. Analysis of Landslide Triggering Rainfall Threshold for Prediction of Landslide Occurrence. Ph. D. Dissertation. Sejong University.

Oh, Kyoung Doo, Chang Hee Lee, Byung Hwa Kang, Jae Young Heo, and Shin Bum Hwang. 2013. A Methodology to Analyse Landslide and Debris-flow Hazards due to Heavy Rainstorms - Application on the Damage Areas around Woomyon Mountain. *Crisisonomy*. 9(9): 45-66.

Tak, Won Jun. 2015. A Study on the Transport and Diffusion Range Estimate of Debris Flow Using RAMMS. Master's thesis. Kangwon National University.

*Korean References Translated from the English*

- 강효섭, 김윤태. 2015. 토석류 수치해석을 통한 건물의 물리적 취약곡선 연구. 한국방재학회논문집. 15(5): 155-167.
- 건설교통부. 2000. 수자원관리기법개발연구조사 보고서.
- 기상청. 2010. 이상기후 특별보고서.
- 김남균. 2011. FLO-2D를 이용한 토석류의 이동과 확산에 관한 연구. 강원대학교 석사학위논문.
- 김병식, 윤선규, 양동민, 권현한. 2010. 격자기반의 개념적 수문 모형의 개발. 한국수자원학회 논문집. 43(7): 667-679.
- 김승은, 백중철, 김경석. 2013. FLO-2D 모형을 이용한 우면산 토석류 유동 수치모의. 대한토목학회 논문집. 33(3): 965-974.
- 김연중, 윤종성, Kohji Tanaka, 허동수. 2015. 가능 최대강수량에 의한 토석류 범람 예측. 한국수자원논문학회 논문집. 48(2): 115-126.
- 오경두, 이창희, 강병화, 허재영, 황신범. 2013. 집중호우로 인한 산사태 및 토석류 위험도 분석. 한국위기관리논문집. 9(9): 45-46.
- 오정림. 2013. 산사태 발생 예측을 위한 유발 강우기준 연구. 세종대학교 박사학위논문.
- 탁원준. 2015. RAMMS를 이용한 토석류 이동과 확산범위 산정에 관한 연구. 강원대학교 석사학위논문.

---

Received: May 17, 2016 / Revised: Jun. 13, 2016 / Accepted: Aug. 23, 2016

## 홍수유출모형과 토석류모형의 Coupling을 이용한 토석류 이동과 확산범위 산정에 관한 연구

국문초록 산지가 많은 국내에서는 산지지역뿐만 아니라 도심지에서의 토석류 피해 또한 급증하고 있다. 이러한 토석류로 인한 피해를 줄이기 위해서는 토석류를 유발시키는 강우의 해석이 먼저 선행되어야 한다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 우면산 산사태 피해지역에서 가장 큰 피해를 발생시킨 래미안 아파트 일대를 대상지역으로 선정하였고 토석류를 유발시키는 강우를 해석하기 위해 분포형 강우-유출모형인 Spatial Runoff Assessment Tool (S-RAT)모형을 사용하였으며, 토석류 확산면적을 산정하기 위해 토석류 2차원 수치해석모형인 Rapid Mass Move Simulation (RAMMS)모형을 사용하여 Couple Modeling을 하였다. 또한 항공영상사진의 실제 토사피해 확산면적에 보정하기 위하여 정량지수(NSI) 산정방법을 이용하여 토사농도( $C_v$ ), 유속( $V$ ), 점성마찰계수( $\mu$ ), 난류마찰계수( $X_i$ )에 대한 최적의 매개변수를 산정하였다. 그 결과 실제 우면산 산사태가 발생했을 때의 강우 빈도는 200년 빈도 이상의 강우가 발생하였으며, 200년 빈도의 강우를 사용한 래미안 아파트 일대 피해면적은  $65,430\text{m}^2$ 으로 모의되었다.

주제어 : 토석류, 강우, S-RAT, RAMMS, couple modeling, 확산면적

Profiles **Dong Ho Nam** : He received his Master of engineering from Kangwon National University, Korea in 2014. He is a Ph.D. course of the Department of Urban & Environmental Disaster Prevention Engineering at Kangwon National University. His interesting subject of research is landslide and hydrological analysis and radar rainfall([skaehdghkk@kangwon.ac.kr](mailto:skaehdghkk@kangwon.ac.kr)).

**Suk Ho Lee** : He received his Ph.D. from Konkuk University, Korea in 2012. He is a research professor of the School of Disaster Prevention at Kangwon National University. His interesting subject of research is landslides and hydrological analysis([esoco@kangwon.ac.kr](mailto:esoco@kangwon.ac.kr)).

**Kye Won Jun** : He received his Ph.D. degree from Chungbuk National University, Korea in 2004. He is a professor of the Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University, in which he has taught since 2004. His interesting subject and area of research and education are flood prevention, mountainous disaster prevention, and natural disaster prevention & management. He has published 58 articles in journals and written 7 books (including co-author books) ([kwjun@kangwon.ac.kr](mailto:kwjun@kangwon.ac.kr)).

**Byung Sik Kim** : He received his B.A., M.A., Ph.D. from Inha University Korea in 2005. He is a professor of the Department of Urban & Environmental Disaster Prevention Engineering at Kangwon National University, in which he has taught since 2011. His interesting subject and area of stochastic hydrology and climate change. He has published about 150 articles in journals and written 3 books ([hydrokbs@kangwon.ac.kr](mailto:hydrokbs@kangwon.ac.kr)).