FLO-2D 모형을 이용한 우면산 토석류 유동 수치모의

김승은* · 백중철** · 김경석***

Seungeun Kim*, Joongcheol Paik**, Kyung Suk Kim***

Run-out Modeling of Debris Flows in Mt. Umyeon using FLO-2D

ABSTRACT

Multiple debris flows occurred on July 27, 2012 in Mt. Umyeon, which resulted in 16 casualties and severe property damage. Accurate reproducing of the propagation and deposition of debris flow is essential for mitigating these disasters. Through applying FLO-2D model to these debris flows and comparing the results with field observations, we seek to evaluate the performance of the model and to analyse the rheological model parameters. Representative yield stress and dynamic viscosity back-calculated for the debris flows in the northern side of Mt. Umyeon are 1022 Pa and 652 Pa·s, respectively. Numerical results obtained using these parameters reveal that deposition areas of debris flows in Raemian and Shindong-A regions are well reproduced in 63 - 85% agreement with the field observations. However, the propagation velocities of the flows are significantly underestimated, which is attributable to the inherent limitations of the model that can't take the entrainment of bed material and surface water into account. The debris flow deposition computed in Hyeongchon region where the entrainment is not significant appears to be in very good agreement with the field observation. The sensitivity study of the numerical results on model parameters shows that both sediment volume concentration and roughness coefficient significantly affect the flow thickness and velocity, which underscores the importance of careful selection of these model parameters in FLO-2D modeling.

Key words : Debris flow, Numerical Modeling, FLO-2D, Deposition, Mt. Umyeon

초 록

2011년 7월 27일 우면산 유역에서 일련의 토석류가 발생하여 많은 인명과 재산 피해를 야기했다. 이러한 토석류 피해를 저감하기 위해서는 토석류가 어떻게 이동하고 퇴적되어 하류부에 피해를 주는지를 예측할 수 있는 기술이 필요하다. 이 연구에서는 우면산 토석류에 대해서 FLO-2D 수치모형을 적용하여, 모형의 성능을 평가하고, 이들 토석류의 유동 매개변수를 분석하였다. 우면산 북측사면에서 발생한 토석류의 현장 관측 자료와 FLO-2D 모의 결과 분석을 통해서 역산된 우면산 토석류의 대표 항복응력은 1,022 Pa 그리고 대표 동점성은 652 Pa·s 인 것으로 나타났다. 선정된 매개변수를 이용하여 우면산 토석류의 퇴적영역을 산정한 결과, 래미안 유역의 경우 63 - 85% 정확도의 피해유역을 재현됨으로서 FLO-2D 모형은 피해유역 산정에 적합한 것으로 나타났다. 하지만, FLO-2D 모형이 침식물질과 우수의 연행작용을 고려할 수 없는 고유의 한계 때문에 연행작용이 현저한 래미안 및 신동아 유역 토석류의 유하속도는 과소평가하는 것으로 나타났다. 유하부에서 침식에 의한 연행작용이 활발하지 않은 형촌마을 유역 토석류는 수로와 저수지 상부 부근에서의 퇴적을 우수한 정확도로 모의되었다. 민감도 분석 결과 유사체적농도와 바닥조도계수 모두 토석류의 흐름두께와 유속 모두에 상당한 영향을 미치는 것으로 나왔으므로, 이들 매개변수의 선정에 신중해야 함을 보여주었다.

검색어 : 토석류, 수치모의, FLO-2D, 퇴적, 우면산

* 강릉원주대학교 토목공학과 (silver-virgo@hotmail.com)

** 정회원 · 교신저자 · 강릉원주대학교 토목공학과 (Corresponding Author · Gangneung-Wonju National University · paik@gwnu.ac.kr)

*** 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 (kskim2k4@ex.co.kr)

Received December 28 2012, Revised February 21 2013, Accepted March 16 2013

1. 서론

토석류는 우리나라의 경우 사면붕괴와 지표 유출이 결합해서 발생하는 자연재해로서 주로 집중호우에 의해 발생한다. 2000년대 들어서 대규모 태풍 ‘루사’와 ‘매미’ 등으로 인해 그리고 2006년 집중호우로 인해 우리나라 중부지방에 많은 토석류가 발생하였으며(김경석 2008), 2011년 7월 서울시 서초구에 위치한 우면산 일대의 수십여 곳에서 동시 다발적으로 발생한 토석류는 많은 인명과 재산의 손실을 야기했다(수충부 및 토석류 방재기술 연구단 2011). 규모면에서 보다 큰 토석류가 이전에도 강원지역 등에서 발생하였음에도 불구하고 우면산 토석류가 사회적으로 가장 큰 관심을 불러일으킨 것은 이 사건이 서울 도심지에서 발생하였으 며, 이로 인해 많은 인명과 재산 피해가 발생하였기 때문이다. 우리나라는 외국에 비해 토석류에 대한 선행연구가 많지 않아 토석류에 의한 위험에 그 만큼 많이 노출되어 있다고 볼 수 있다. 이러한 토석류로 인한 피해를 저감하기 위해서는 토석류가 어디에서 발생할지를 예측하고, 발생한 토석류가 어떻게 이동하고 퇴적되어 하류부에서 피해를 주는지를 예측할 수 있는 기술개발이 선행되어야 한다.

이 연구에서는 토석류의 유동을 예측할 수 있는 수치모형 중 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 FLO-2D 수치모형을 우면산 토석류에 적용하여 이 모형의 성능을 평가하고자 한다. FLO-2D는 홍수 범람과 이류(二流) 및 토석류(土石流)를 모의하는 2차원 유한차분모형(finite different model)으로서 토석류 및 토사 흐름, 시가지 유출, 충적하천의 홍수흐름과 같은 모의를 수행할 수 있다. 이미 많은 연구자들이 실제 토석류를 모의하는데 사용하였으며 미국, 이태리, 스위스, 대만을 포함하는 여러 국가에서도 FLO-2D를 적용하였다(Julien and O'Brien, 1997; Bertolo and Wiczorek, 2005; Lin et al., 2005; Mikoš et al., 2006; Cetina et al., 2006, Hsu et al., 2010, Lin et al. 2011, Li, et al. 2011, Luna, et al. 2011). 이들 중 몇몇 사례만 언급하면, Lin, et al.(2011)은 2004년 태풍 민들레(Mindulle)로 인한 대만 Song-Her 지역에서 발생한 토석류를 모의하였으며, 연구를 통해 조도계수가 증가하면 토석류의 이동거리가 감소하고, 최대 퇴적 깊이가 증가하며, 흐름과정 동안 토석류의 속도가 감소한다는 것을 나타냈다. Mikoš et al.(2006)은 슬로베니아의 Koseč지역의 수로높이의 적절성을 FLO-2D와 DEBRIF-1D를 사용하여 검증하고, 실제 방재 구조물을 설계하는데 사용하였다. Bertolo and Wiczorek.(2005)은 미국 캘리포니아주의 Yosemite 계곡에 1차원 모델인 DAN(Dynamic ANalysis)과 FLO-2D를 적용하여 연구지역에서 관찰된 토석류의 유출거리와 속도를 비교분석하였다. 실제로 토석류와 같이 물과 토석이 함께 섞여서 흐르는 유체의 흐름은 점성 및 항복응력, 농도

등이 다르기 때문에 FLO-2D 모의를 수행할 때 조건에 따라 입력 값을 바꿔가면서 현장 특성에 맞게 분석하여야 한다.

2011년 7월 27일 우면산에서 발생한 일련의 토석류는 전례 없이 많은 피해를 남겼지만, 이와 함께 많은 유용한 현장자료가 수집되었다. 우선 우면산 북측사면에서는 우리나라에서 처음으로 토석류가 유하하는 장면이 시민들에 의해서 동영상으로 관측되어 우리나라 토석류의 유속을 추정할 수 있는 자료가 확보되었다. 그리고 접근이 용이한 도심지에서 발생하여 많은 연구팀에 의해서 수리, 수문, 지반, 입상 등 다양한 현장 자료가 사건 직후에 확보되었다. 이들 중 일부는 토석류의 유동 및 퇴적 양상을 현장자료에 근거해서 보다 정확하게 예측하고 우리나라 토석류의 유동 매개변수를 추정할 수 있는 중요한 기초자료이다. 이 연구에서는 흐름 동영상자료 및 현장조사 자료를 이용하여 FLO-2D 모형을 적용하여 이들 토석류에 대한 유동 매개변수들을 산정하고, 모형의 적용성을 평가하고자 한다. 아울러, 주요 유동 매개변수가 우면산 토석류의 유동에 미치는 영향 즉 민감도 분석 결과를 제시하여 FLO-2D 모형을 적용하여 토석류 위험도 및 퇴적영역을 설정할 때 유용한 기본적인 적용 방향을 제공하고자 한다.

2. 지배방정식

토석류에 의한 위험은 주로 토석이 퇴적되기 시작하는 하류부 영역에서 토석류의 충격에 의한 것이다. 따라서 퇴적유역에서 토석류의 전파 및 퇴적을 재현하는 것은 토석류 위험도를 평가하는데 중요하다. FLO-2D 수치모형은 상류부에서 유입되는 일정량의 토석류가 하류부 유역에서 퇴적되는 영역 및 퇴적 두께를 모의할 수 있는 반면에 토석류가 유하하면서 발생하는 침식작용은 모의할 수 없는 한계가 있다. 하지만 토석류 흐름을 추적하고 토석의 퇴적을 모의하는데 적합하다.

FLO-2D 수치모형의 지배방정식을 다음과 같이 일반적인 흐름 방정식인 연속방정식과 2개의 운동량방정식으로 구성되어있다(FLO-2D, 2009).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = i \quad (1)$$

$$\begin{aligned} S_{fx} &= S_{bx} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial u}{g \partial t} - u \frac{\partial u}{g \partial x} - v \frac{\partial u}{g \partial y} \\ S_{fy} &= S_{by} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial v}{g \partial t} - u \frac{\partial v}{g \partial x} - v \frac{\partial v}{g \partial y} \end{aligned} \quad (2)$$

O'Brian and Julien(1985)의 유변학 모형은 다음과 같다.

$$\tau = \tau_y + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (3)$$

$$= \tau_y + \eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + C \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2$$

여기서 τ 는 총 전단응력이며, τ_y 는 항복전단응력으로서 Mohr-Coulomb 전단저항(shear resistance)을 나타내며, τ_v 는 점성전단응력, τ_t 는 난류전단응력, τ_d 는 분산(dispersive)전단응력, η 는 동점성(dynamic viscosity) 그리고 C 는 내부(internal)전단계수를 나타낸다.

$$C = \rho_m l^2 + f(\rho_m, C_v) d_s^2 \quad (4)$$

여기서 ρ_m 은 유사혼합체의 밀도, l 은 Prandtl의 혼합길이(mixing length), d_s 는 유사입경, C_v 는 유사체적농도이다. Bagnold (1954)는 $f(\rho_m, C_v)$ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$f(\rho_m, C_v) = a_i \rho_m ((C^*/C_v)^{1/3} - 1) \quad (5)$$

여기서, a_i 는 경험계수로서 0.01이며, C^* 는 유사입자의 최대체

적농도이다.

식(3)을 수심적분하면 다음과 같이 경사형식(gradient form)으로 표현할 수 있다.

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K \eta u}{8 \gamma_m h^2} + \frac{n^2 u^2}{h^{4/3}} \quad (6)$$

위 식에서 S_y 는 항복경사, S_v 는 점성경사, S_{td} 는 난류-분산경사, γ_m 은 유사혼합물(sediment mixture)의 비중량, K 는 저항매개변수, 그리고 n 은 등가Manning계수값이다.

토석류 해석을 위해서는 토석류의 유사농도, 그리고 항복응력과 점성력에 대한 계수를 입력해야한다. 항복응력과 점성력을 산정하기 위한 매개변수 값은 개발자의 현장 경험식을 바탕으로 프로그램 매뉴얼에 정리되어있다. 항복응력과 점성계수는 유사 농도 및 경험 계수에 따라 다양한 값을 가지며, 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C}, \quad \eta = \alpha_2 e^{\beta_2 C} \quad (7)$$

Table 1. Empirical coefficients of yield stress and dynamic viscosity (O'Brien & Julien, 1998)

source	$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$ (1PA=dynes/cm ²)		$\eta = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$ (1Pas=10poises)	
	α_1	β_1	α_2	β_2
Relationships Found in Field				
Aspen Pit 1	0.181	25.7	0.0360	22.1
Aspen Pit 2	2.72	10.4	0.0538	14.5
Aspen Natural Soil	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen Mine Fill	0.0473	21.1	0.128	12.0
Aspen Watershed	0.0383	19.6	0.000495	27.1
Aspen Mine Source Area	0.291	14.3	0.000201	33.1
Glenwood 1	0.0345	20.1	0.00283	23.0
Glenwood 2	0.0765	16.9	0.0648	6.20
Glenwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1
Relationships Found in Literature				
Iida (1938)	-	-	0.0000373	36.6
Dai et al. (1980)	2.60	17.48	0.00750	14.39
Kang and Zhang (1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29
Qian et al. (1890)	0.00136	21.2	-	-
	0.050	15.48	-	-
Chen and Ma (1958)	0.0588	19.1-32.7	-	-
Fei (1981)	0.166	25.6	-	-
	0.00470	22.2	-	-

$$n = n_t + n_d = n_t + 0.0538n_t e^{6.0896C} \quad (8)$$

여기서, n_t 는 난류 Manning 계수값이며, n_d 는 분산 Manning 계수값이다. 식 (7)에서 항복 및 점성응력은 유사체적농도의 함수이며, α_1 , α_2 , β_1 그리고 β_2 는 실험을 통해 결정된 경험계수로서 일부 선행 연구자들의 연구결과를 요약하였으며, 그 값을 정리하면 Table 1과 같다.

3. 우면산 토석류 유동 특성

본 논문에서 연구를 수행한 유역은 Fig. 1에서 보인바와 같이, 우면산의 북측에 위치한 래미안 아파트와 신동아 아파트의 유역과 우면산의 남측에 위치한 형촌마을의 생태공원저수지 유역이다. 래미안 아파트(이하 래미안 유역)는 산의 정상부근에서 발생한 토석류가 유하하면서 흐름이 두 개로 나뉘었으며, 신동아 아파트(이하 신동아 유역)도 마찬가지로 유하도중 다른 지류로 이동하였으나, 두 유역 모두 대부분 본래의 수로를 따라 토석류가 이동하여 하류부에 도달하였다. 이 토석류로 인해 래미안 유역은 5가구가 매몰되고 3명의 사망자가 발생하였으며, 신동아 유역은 1가구가 매몰되고 4명의 사망자가 발생하였다. 형촌마을을 역시 집중호우로 인한 토석류와 생태저수지 제체의 일부 유실로 인한 홍수로 120가구 중 60가구가 고립되고 1명의 사망자를 포함한 10명의 사상자가 발생하였다.

토석류가 발생한 직후 현장조사를 통해 래미안 유역과 신동아 유역에 대한 발생부의 크기, 경사, 유역길이, 폭 그리고 국부적인 지형적 특성에 따라 토석류의 영향이 큰 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 현장 조사를 통해 구한 토석류 특성 값과 각 유역의 총 퇴적토석량을 구하였다(백중철 2011). 그 결과를 보면, 래미안 유역은 초기에 발생한 토석량 $4,200\text{m}^3$ 이 약 600m의 유역을 유하하며 토석류의 규모가 증가하였다. 신동아 유역 역시 초기 발생 토석이 600m의 수로를 유하하며 그 규모가 크게 증가하였는데 토석류는 이동 중 침식에 의한 연행효과로 그 규모를 증가시키면서 유하하기 때문에 정확한 토석량을 예측하기란 어려움이 있다. 따라서 현장조사와 보도자료 등을 통해 하류부에 퇴적된 토석량을 추정하였으며, 추정된 총 퇴적토석량은 래미안 유역이 $42,500\text{m}^3$, 신동아 유역이 $44,500\text{m}^3$ 이다.

우면산 토석류가 과거 국내에서 발생한 토석류와 가장 큰 차이점은 토석류 발생 당시의 관측영상의 존재한다는 것이다. 우면산에서 토석류가 발생한 지역 중 우면산 북측에 위치한 래미안 유역과 신동아 유역에서 발생한 토석류가 주민들에 의해 촬영되었으며, 촬영 영상을 바탕으로 토석류 선단부의 속도를 분석하였다. 유속측정을 위해 우선 영상 내에서 토석류의 이동거리를 현장에서 실측하

Fig. 1. Regions of interest in Mt. Umyeon

Fig. 2. Debris flow propagation tributaries in Hyeongchon village area(Korean Geotechnical Society, 2011)

고, 현장조사를 통해 지형적인 특성을 조사한 후에 동영상의 초당 프레임 수에 근거해서 유속을 산정하였다. 산정한 유속은 래미안 유역에서 28m/s, 28.6m/s이며, 신동아 아파트는 18.6m/s로 추정되었다. 래미안 유역은 서로 다른 지점에서 촬영되었음에도 비슷한 유속을 가짐을 확인할 수 있었다(백중철, 2011).

형촌마을은 현장자료가 부족하였기 때문에 한국지반공학회에서 수행한 우면산 산사태 원인조사 최종보고서(한국지반공학회, 2011)를 참고하였다. 이 유역은 래미안과 신동아 유역에서 발생한 토석류와는 달리 10개의 계곡에서 시작하여 주 계곡을 따라 하류부로 이동하였다. 10개 발생부에서의 토석 발생량은 약 $3,800\text{m}^3$ 이다(한국지반공학회, 2011). 이 지역에서는 토석류 발생 당시의 상황이 관측된 바가 없으므로, 유역의 주계곡은 약 580m이며, 지류에 따라 다르지만 일반적으로 지류와 주계곡간의 거리는 150m ~ 300m 정도이다.

Fig. 3. Regions for FLO-2D simulation(white lines in each region denote inflow sections) (left, Raemian; center, Shindong-a; right, Hyeongchon)

Table 2. Computational conditions

Inflow cell size	3m × 3m	Sediment Concentration	0.46 ~ 0.52
K	0	Inflow time	0.02h (72s)
Manning's n	0.02 ~ 0.06	Specific weight of the sediment	2.0
Simulation time	Raemian	Shindong-A	Hyeongchon
	0.1h (360s)	0.15h (540s)	0.5h (1800s)

4. 모형 적용

래미안, 신동아 그리고 형촌마을 각 계산영역은 주계곡 중심으로 설정하였으며, 각 영역에서의 퇴적지역을 포함한다. Fig. 3에 포함된 3 개의 그림은 각각 래미안 유역, 신동아 유역 그리고 형촌마을 계산영역과 유입단면을 나타낸 것이다.

기존에 국내에서 발생한 토석류에 대한 유동 특성 분석과 그에 근거한 유동 매개변수 자료가 없기 때문에 모의에 필요한 변수의 대부분을 현장조사 자료와 계산 결과의 비교를 통해 항복응력과 점성계수 등을 역산하였다. 계산에 사용된 조건들을 정리하면 Table 2과 같다.

4.1 DEM

모의에 사용한 DEM은 10m×10m의 해상도를 가진다. 서울시 수치지도를 보유하고 있지 않으므로 DEM 데이터만 이용하였다. 즉, 우면산의 지형(고도 경사 등)은 모의에서 고려되었으나 남부순환로 하류부 유역은 하향경사를 갖는 평지로 모의되어 건물의 영향은 적절히 고려되지 않았다.

4.2 유사농도(Sediment Concentration)

토석류는 유체와 토석의 혼합체로 모래입자 이상의 크기를 가진 토석이 전체 체적의 50%이상을 함유하고 있는 경우를 토석류로 분류하기도 한다(Takahashi, 2007, Pierson & Costa, 1987). 하지만, 래미안과 신동아 유역에서 관측된 토석류의 유속은 매우 빠른 것으로 나타났으며, 이는 유동성이 크다는 것을 의미한다. 이러한 현상은 사건 발생순간에도 호우가 발생하여 지표면에 많은 유출수가 존재하여 토석류의 체적농도가 적었기 때문으로 분석되고 있다(손신해 등, 2012). 따라서 이 연구에서는 유사체적농도 46~54% 범위에 대해서 모의를 수행하여 민감도 분석을 수행하였으며, 2011년 7월 우면산 토석류에 대해서는 대표 유사체적농도로 52%를 선정하였다. 대표 유사체적농도에 대한 모의 결과와 민감도 분석결과는 다음 장에서 기술하였다.

4.3 K(층류흐름에 대한 저항매개변수)

지표면의 종류에 따라 K는 24부터 50,000까지 설정할 수 있지만, '0'을 입력할 경우 조도계수에 따라 프로그램 자체 함수에 의해서 자동적으로 계산된다. 이 연구에서는 매개변수 산정의 불확실성을 줄이기 위해서 자체 함수를 이용하여 계산하였다.

4.4 Manning's n (조도계수)

Manning's n 은 난류와 함께 관성입자전단(inertial grain shear)와 관련된 분산(dispersive)에 의한 흐름저항 성분을 반영한다. 지표면의 수리학적 조도를 고려하기 위해서 각 계산격자 요소별로 이 값을 설정할 수 있다. 즉, n 값은 서로 다른 지표면 피복상태를 반영하기 위해서 공간적으로 서로 다른 값을 부여할 수 있다(FLO-2D, 2009). Jin & Fread(1999)는 계곡이나 산지에서 대부분의 물의 흐름은 $0.02 \sim 0.05 \text{sm}^{-1/3}$ 의 조도계수를 갖는데 토석류와

같은 흐름에 대해서는 3배 정도 큰 값을 적용하였다. 최근 외국 적용사례를 보면 Luna et al.(2011)은 수로형 토석류(channelized debris flow)가 발생한 이탈리아 중앙 알프스 Valtellina 계곡에 위치한 Selvetta 유역의 조도계수를 특성화하는 값으로 $0.04\text{sm}^{-1/3}$ 을 적용하였다. Li et al.(2011)은 2009년 8월 대만 Hsiaolin 마을에서 발생한 토석류를 재현하기 위해서 사면 흐름에 대한 조도계수 값으로 $0.06\text{sm}^{-1/3}$, 그리고 하천으로 토석류가 유입된 후의 농도가 낮은 흐름에 대해서는 $0.045\text{sm}^{-1/3}$ 의 조도계수 값을 적용하였다. 이 연구에서는 현장 조사 자료에 근거해서 우면산 사면에서 발생한 토석류의 대표 조도계수 값으로 $0.06\text{sm}^{-1/3}$ 을 선정하여 모의 결과를 제시한다. 식 (8)을 이용할 경우 이 값은 난류조도계수 n_t 가 약 $0.026\text{sm}^{-1/3}$ 에 해당한다. 아울러, 이 연구에서는 조도계수로 $0.02 \sim 0.1\text{sm}^{-1/3}$ 범위의 값을 적용하여 산정한 토석류 계산 값을 비교분석함으로써 토석류 흐름의 조도계수에 대한 민감도 분석 결과를 제시한다.

4.5 유입량

FLO-2D 모의 시에는 토석류의 연행작용을 고려하지 못하므로 발생한 토석류의 총 퇴적 토석량을 유입량으로 설정하게 된다. 각 유역에 대한 유입량을 산정하기 위해 발생부의 폭과 격자 크기를 고려하여 유입격자의 수를 결정한 후 유량유입시간에 따른 유입량을 산정하였다. 래미안 유역의 총 퇴적 토석량은 앞 절에서 기술했듯이 $42,500\text{m}^3$ 이다. 유량 입력 격자 개수는 총 20개이고 유량유입시간은 72초 이므로 각 격자 당 유입유량은 약 $29.51\text{m}^3/\text{s}$ 이다. 같은 방법으로 신동아 유역의 경우 총 퇴적토석량은 $44,500\text{m}^3$ 이며 격자 개수는 15개이므로 유입유량은 약 $41.20\text{m}^3/\text{s}$ 이다. 토석류의 비중으로는 2.0을 적용하였다. 이 결과를 요약정리하면 Table 3과 같다.

형촌마을은 현장데이터가 부족하였기 때문에 우면산 산사태 원인조사 최종보고서(한국지반공학회, 2011)를 참고하여 발생량을 산정하였다. 보고서에 따르면 형촌마을에서의 토석류 발생량은 약 $3,800\text{m}^3$ 이며, 래미안 유역의 경우 초기 발생량에서 총 퇴적토석량이 약 10배가량 증가하였으므로 형촌마을 역시 세굴에 의해 총 퇴적 토석량이 10배정도 증가하였을 것으로 추정하여 $38,000\text{m}^3$ 으로 산정하였다. 형촌마을 생태저수지 상류부 10개 지점에서 발생

Table 3. Inflow rate and the number of elements in each application area.

Site	Raemian	Shindong-A	Hyeongchon
Total deposition volume (m^3)	42,500	44,500	38,000
Inflow cell (ea)	20	15	14
Inflow rate (m^3/s)	29.51	41.20	74.97 ~ 130.16

한 토석류들이 동시에 발생하였는지 아니면 시차를 두고 발생하였는지 알 수 없다. 하지만 모든 발생지점이 동일 수계 내에 위치하고 있으며, 근처에서 사면붕괴가 발생하면 인접 사면에서도 발생할 가능성이 높은 점을 감안하면, 동시에 발생하지 않았더라도 시차가 크지 않았을 것으로 판단된다. 이 연구에서는 4개의 지점에서 사면 붕괴가 동시에 발생하였다고 가정하였으며, 10개 유역에서 발생한 토석류의 전체량이 이들 4개 지점에 소유역 크기에 따른 비율에 따라 나뉘어져 동시에 발생한 것으로 계산을 수행하였다. 앞 절에서 제시한 Fig. 2에서 적색으로 표시된 계곡에 대해 모의를 수행하였으며, 푸른색으로 표시한 곳은 우면산 자연생태공원내의 저수지를 나타낸 것이다. 이 유역의 유입량 격자의 수는 발생부 폭에 따라 각각 1, 2, 3, 8개이며, 유량유입시간은 72초이므로 각 유역의 격자당 유입유량은 $106.44\text{m}^3/\text{s}$, $74.97\text{m}^3/\text{s}$, $84.66\text{m}^3/\text{s}$, $130.16\text{m}^3/\text{s}$ 이다. 각 유역에 대한 유입량 수문곡선을 나타내면 Fig. 4와 같다.

Fig. 4. Inflow hydrograph for each application area: a, Raemian; b, Shindong-a; c, Hyeongchon)

5. 결과 분석

FLO-2D 모형의 적용은 먼저 동영상 자료가 확보되어 유속 추정인 가능하고, 비교적 사건 직후 확보된 현장조사 자료가 상대적으로 풍부한 우면산 북측사면의 래미안과 신동아 유역에 대해서 수행하였다. 위에서 언급한 다양한 매개변수 값들의 조합을 이용하여 모의를 수행하였으며, 계산결과를 현장 관측 자료와 비교하여 래미안 및 신동아 유역에서 발생한 토석류를 특성화 할 수 있는 매개변수를 역산하였다. Table 1에 정리되어 있는 다양한 항복응력과 점성계수의 조합을 적용하여 모의를 수행한 결과, Aspen 유역 조건과 Glenwood1 조건이 래미안과 신동아 유역 하류부의 건물, 방음벽과 같은 장애물을 고려하지 못한 점을 제외한다면 이 두 유역에서 발생한 토석류의 실제 궤적과 가장 유사한 모의 결과를 나타냄을 확인할 수 있다. 즉, 우면산 북측사면 래미안 및 신동아 유역에서 발생한 토석류에 대해서 역산한 매개변수로서 항복응력

Fig. 5. Time evolution of debris flow thickness computed using Aspen watershed conditions in Raemian region

Fig. 6. Time evolution of debris flow thickness computed using Aspen watershed conditions in Shindong-a region

τ_y 는 1022Pa 그리고 동점성계수 η 는 652 Pa·s로 선정되었다. 따라서 이들 매개변수를 이용하여 계산된 시간간격별 토석류의 흐름두께(flow thickness)를 그리면 Fig. 5 및 6과 같다. 이 그림에서 빨간선은 계산영역을 나타내며 계산영역안의 그림은 토석류의 이동궤적을 나타낸다. 한편, 각 그림에서 등치면은 붉은 색을 필수록 토석류의 흐름두께가 큼을 의미한다.

Fig. 7은 모의 결과를 바탕으로 각 유역에서 토석류의 실제 발생 영역과 FLO-2D 모의결과를 비교한 것이다. 한 가지 주목할 것은 실제 토석류의 경우 퇴적지역에서 물과 토석이 분리된 후, 상대적으로 낮은 농도 형태의 과농도류(hyperconcentrated flow) 또는 보다 더 낮은 농도의 약간의 소류사와 부유사를 포함하는 홍수류의 형태로 하류부로 더 멀리 이동하게 된다. Fig. 7에서 실제 퇴적 영역은 과농도류나 홍수류가 이동한 범위가 아니라, 토석류의 퇴적층이 일정한 두께로 확연히 형성된 범위를 나타낸다. 이러한 방법으로 토석류 퇴적 영역을 설정하는 것이 물리적으로 적합할 뿐만 아니라 실제 토석류 피해영역을 결정하는데 보다 합리적이다.

Fig. 7에 보인 바와 같이, 모의결과에 나타난 발생부에서의 영역과 실제 영역이 차이가 있는 것은 유량유입격자의 크기나 개수 또는 DEM 자료의 오차 등으로 볼 수 있다. 이 점을 제외한다면 실선으로 표시된 래미안 유역의 토석류 궤적과 점선으로 표시된 모의 결과가 양호한 정확도로 일치하는 것으로 나타났으며, 모의결과를 발생 및 퇴적 지역 전체 면적으로 비교해 보면 래미안의 경우 약 85% 그리고 신동아 유역의 경우 약 63%정도 관측 값과 일치하는 것을 나타냈다. 오차의 대부분은 사면을 따라서 유하하는 토석류의 속도를 과소 산정하기 때문으로 판단된다.

유속의 과소 산정은 관성항의 영향 감소로 토석류가 특히 경사가 작은 하류부에서 넓게 퍼지기 때문으로 판단된다. 유속을 과소산정

Fig. 7. Comparison of computed and measured deposition areas of debris flows in [left] Raemian and [right] Shindong-a regions.

한 원인은 두 가지로 볼 수 있다. 첫째, FLO-2D 모형이 침식에 의한 연행작용을 계산에 반영하지 못하므로, 특히 하류부 유량증가와 유속 증가를 적절히 재현할 수 없기 때문으로 판단된다. 둘째는, 강우 중 발생한 토석류의 경우 유역 사면에 존재하는 유출수를 토석류에 유입시킬 수 없기 때문에 유동성이 커짐을 재현할 수 없기 때문으로 판단된다. 최근 Iverson et al.(2011)의 연구에 의하면 강우시 토석류가 유하하면 유동성(유속)과 연행량이 크게 증가함을 알 수 있다. 이상의 결과를 보면 FLO-2D 모형은 침식에 의한 연행작용에 따른 전체 용량 증가와 이에 따른 유동성 변화 그리고 강우로 인한 지표면 유출수의 영향을 고려할 수 없기 때문에 빠른 유속을 적절히 재현할 수 없는 단점이 있다. 하지만 서론에서 기술했듯이 토석류의 영향범위를 예측하기에는 유용한 것으로 나타났다.

Fig. 8. Computed debris flow propagation in Hyeongchon village region

Fig. 9. Deposition thickness of debris flow computed in Hyeongchon village region

형촌마을은 전체 발생한 10개의 지류 중 4개를 선정하여 유량을 입력하였으며, 지형자료는 저수지의 여수로 부분이 일부 유실된 실제 지형을 고려하였다. 앞서 기술한 바와 같이 형촌마을 유역은 토석류의 유동 영상 등 발생 당시의 상황을 알 수 있는 자료가 없으므로, 매개변수의 역산이 극히 제한적이다. 따라서 항복응력과 동점성계수 등의 매개변수는 래미안과 신동아 유역 토석류를 대상으로 역산한 값을 그대로 적용하였으며, 그 계산 결과를 일정 계산시간 별로 그리면 Fig. 8과 같다. Fig. 9는 최종 계산결과를 확대한 것으로서, 계산결과에 따르면, 이 유역에서 발생한 토석류가 저수지를 직접 월류하지 않고 대부분 저수지 내부와 저수지 상류부 수로에 퇴적되며, 매우 적은 양부분만 여수로가 유실된 부분으로 유하하는 것으로 나타났다. 이러한 계산결과는 Fig. 10에 나타난 현장사진과도 일치한다.

형촌마을 유역은 우면산의 북측에 위치한 유역 사면과 달리 주수로(main channel)가 암반으로 노출되어있기 때문에 주수로로 유입된 토석류에는 연행되는 하상물질이 거의 없다는 것을 주목할 만하다. 수치 모델링에 의해 계산된 토석류의 퇴적은 형촌마을의 현장 관측과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 연행작용

Fig. 10. Deposition materials captured in Hyeongchon village region just after debris flow event: [upper] location ① and [lower] location ② in Figure 9.

Fig. 11. Deposition zone of debris flow computed using different sediment volume concentration in Raemian region

을 모의할 수 없는 FLO-2D 모형의 경우 이러한 토석류의 유동을 잘 재현할 수 있기 때문이다. 즉 FLO-2D 모형은 하상물질의 연행이 크지 않은 토석류의 흐름을 합리적으로 재현할 수 있음을 위에서 보인 전반적인 수치해석 결과에서 알 수 있다.

마지막으로 사건 직후 현장자료가 가장 잘 확보된 래미안 아파트 유역 토석류에 대해서 수치해석 결과에 유사체적농도와 Manning's n 값이 변화가 미치는 영향 즉 민감도 분석 결과를 제시하고자 한다. 먼저 46%부터 54% 범위의 유사체적농도에 따른 토석류의 이동 및 퇴적 특성을 분석하였다. Fig. 11은 유사체적농도에 따른 토석류의 퇴적 범위를 정리한 것으로, 농도가 증가할수록 퇴적 영역이 급격히 감소함을 확인할 수 있다. 이것은 FLO-2D 모형에서 유사체적농도에 따라 항복응력과 점성력이 다르게 계산되기 때문이다.

유사체적농도가 토석류의 흐름깊이와 이동속도에 미치는 영향을 검토하기 위해 유하부의 한 지점에서 토석류의 최대 흐름깊이와 이동속도를 Fig. 12에서 비교하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 유사체적농도가 증가할수록 토석류의 최대 흐름두께가 증가하는 반면에, 이동속도가 감소함을 볼 수 있다. 래미안 유역 토석류 재현시 유사체적농도를 약 8% 증가시킬 경우 유하부에서의 유속은 약 37%로 감소하고 흐름두께는 약 1.8배 증가하는 것으로 나타났다. Manning's n 값을 기존 국외 연구(Luna et al., 2011; Li et al. 2011)와 본 연구에서 적용한 값의 범위에 해당하는 0.04에서 0.06으로 증가시키면 유속은 약 66%로 감소하고 흐름두께는 약 1.5배 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 두 매개변수 모두 토석류의 흐름두께와 유속 모두에 상당한 영향을 미치며, 이들 매개변수 값에 유속이 흐름두께 보다 더 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

Fig. 12. Sensitivity of debris flow thickness and propagation velocity on [upper] sediment volume concentration and [lower] Manning's n .

6. 결론

2011년 7월 27일 우면산에서 발생한 일련의 토석류 중에서 북측 사면 래미안과 신동아 아파트 유역 토석류에 대해서 상용 소프트웨어인 FLO-2D 모형을 적용하여 그 성능을 평가하였다. 흐름 동영상자료 및 현장조사 자료에 근거하여 이들 토석류에 대한 유동 매개변수들을 산정하였으며, 이들 매개변수를 이용하여 형촌마을 유역에서 발생한 토석류에 적용하여 검증하였다. 이 연구에서 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

래미안과 신동아 유역 토석류에 대해서 FLO-2D 수치 모의를 수행하여 주요 매개변수들을 역산한 결과 2011년 7월 발생한 우면산 토석류의 경우 항복응력은 1,000~1,200Pa, 점성력은 400~700Pa·s인 것으로 나타났다. 선정된 매개변수를 이용하여 이들 토석류의 퇴적영역을 산정한 결과 래미안 유역의 경우 85% 정확도로 그리고 신동아 유역은 63%의 정확도로 재현하는 것으로 나타났다. 하지만, 남부순환로를 통과하는 토석류의 유하속도는 절반이하로 과소평가하는 것으로 나타났다. 이용한 DEM 자료의 해상도 등 기초 자료의 부정확 그리고 FLO-2D가 침식에 의한 연행작용을 고려할 수 없음을 감안하면, 토석류 위험지구 선정을 위한 위험영역(퇴적영역) 계산에는 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

유하부에서 침식에 의한 연행작용이 활발하지 않은 형촌마을 유역에서 발생한 토석류는 FLO-2D 모형에 의해서 수로에서와 저수지 상부 부근에서의 퇴적을 실제 관측값과 비교할 때 양호한 정확도로 모의된 것으로 나타났다. 따라서 FLO-2D 모형은 하상물 질의 연행이 크지 않은 토석류 유동 및 퇴적을 합리적으로 재현할 수 있는 것으로 나타났다.

래미안 유역을 대상으로 한 민감도 분석 연구결과, 유사체적농도를 약 8% 증가하면 유하부에서 유속은 약 37%로 감소하고 흐름두께는 약 1.8배 증가하는 한편, Manning's n 값을 0.04에서 0.06으로 증가시키면 유속은 약 66%로 감소하고 흐름두께는 약 1.5배 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 두 매개변수 모두 토석류의 흐름두께와 유속 모두에 상당한 영향을 미치며, 유속이 흐름두께보다 더 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비지원(과제번호 '08지역기술혁신 B-01, 수충부 및 토석류 방재기술 연구단)에 의해 수행되었습니다.

References

- Bagnold, R. A. (1954). "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear." *Proc. of the Royal Soc. of London*, 225, pp. 49-63.
- Bertolo P. and Wiecek, G. F. (2005). "Calibration of numerical models for small debris flows in Yosemite Valley, California, USA." *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 5, pp. 993-1001.
- Cetina, M., Rajar, R., Hojnik, T., Zakrajsek, M., Krzyk, M., and Mikos, M. (2006). "Case study: Numerical Simulations of Debris Flow Below Stoze, Slovenia." *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 132, No. 2, pp. 121-130.
- FLO-2D (2009). FLO-2D: Reference manual, 2009, available at: <http://www.flo-2d.com/wp-content/uploads/FLO-2D-Reference-Manual-2009.pdf>.
- Hsu, S. M., Chiou, L. B., Lin, G. F., Chao, C. H., Wen, H. Y. and Ku, C. Y. (2010). "Applications of simulation technique on debris-flow hazard zone delineation: a case study in Hualien County, Taiwan." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol 10, pp. 535-545.
- Iverson R. M., Reid, M. E., Logan, M., LaHusen, R. G., Godt, J. W. and Griswold, J. P. (2011). "Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment." *Nature Geoscience*, Vol. 4, pp. 116-121.
- Julien, P. Y. and O'Brien, J. S. (1997). "Selected notes on debris flow dynamics, Recent developments on debris flows." *Lecture note in earth sciences*, Springer, Berlin, pp. 144-162.
- Kim, K.-S. (2008). "Characteristics of basin topography and rainfall triggering debris flow." *J. of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 5, pp. 263-271 (in Korean).
- Korean Geotechnical Society (2011). *Final report of investigation of the cause and preparation of countermeasures for landslides in Mt. Umyeon, Report No. KGS11-250*, The Seoul Metropolis (in Korean).
- Li, M.-H., Sung, R.-T., Dong, J.-J., Lee, C.-T. and Chen, C.-C. (2011). "The formation and breaching of a short-lived landslide dam at Hsiaolin Village, Taiwan - Part II: Simulation of Debris Flow with Landslide Dam Breach." *Engineering Geology*, Vol. 123, pp. 60-71.
- Lin, M.-L., Wang, K.-L. and Huang, J.-J. (2005). "Debris flow runoff simulation and verification - case study of Chen-You-Lan Watershed, Taiwan." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 5, pp. 439-445.
- Lin, P.-S., Lee, J.-H. and Chang, C. W. (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*, pp. 947-956.
- Luna, B. Q., Blahut, J., van Westen, C. J., Sterlacchini, S., van Asch, T. W. J., Akbas, S. O. (2011). "The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 11, pp. 2047-2060.
- Mikoš, M., Fazarinc, R., Majes, B., Rajar, R., Žagar, D., Krzyk, M., Hojnik, T. and Četina, M. (2006). "Numerical simulation of debris flows triggered from the strug rock fall source area, W Slovenia." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 6, pp. 261-270.
- O'Brien, J. S. & Julien, P. Y. (1998). "Laboratory analysis of Mud-flow properties." *Journal of Hydraulics Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp. 877-887.
- Paik, J. (2011). "Run-out analysis of debris flows on July 2011 in Mt. Umyeon." *Proc. of 37th Annual Conference of Korean Society of Civil Engineers*, KINTEX, Goyang-si, Korea (in Korean).
- Pierson, T. C. & Costa, J. E. (1987). "A rheologic classification of subaerial sediment-water flows, in Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation." *Rev. Eng. Geol.*, Vol. 7, edited by J. E. Costa and G. F. Wiecek, Geol. Soc. of Am. Boulder, Colo, pp. 1-2.
- RD-FLOW (2011). "Characteristics of 2011 Korean Landslide and Debris Flow Disasters, River and Road in Mountain Area." *Research Center for River Flow Impingement and Debris Flow*, Vol. 4, Special Issue, Gangneung, Korea (in Korean).
- Son, S.-H., Choi, B. and Paik, J. (2012). "Characteristics of rainfall and groundwater level in Mt. Umyeon." *Proc. of 38th Annual Conference of Korean Society of Civil Engineers*, pp. 769-772 (in Korean).
- Takahashi, T. (2007). *Debris flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*, Taylor & Francis Group, London, UK.