DAN3D 모형을 이용한 우면산 토석류 거동 수치모의

Numerical Simulation of Debris Flow Behavior at Mt. Umyeon using the DAN3D Model

이득환* · 이승래** · 박준영***

Lee, Deuk-Hwan*, Lee, Seung-Rae**, and Park, Joon-Young***

Abstract

In this study, the back analysis was conducted using the DAN3D model for debris flows simulation in the Raemian and Sindonga watersheds to quantitatively analyze the influence of entrainment growth rate and rheological properties on the debris flow behavior. The numerical simulation was verified by using the field observation data obtained on July 27, 2011, at Mt. Umyeon, Seoul. The DAN3D model reasonably simulated the increase in the volume of the debris flow, due to entrainment phenomenon. Additionally, the model also provided a good estimation of the debris flow velocity. Furthermore, parametric studies confirmed that interactions between the entrainment growth rate and rheological parameters affect the debris flow velocity, thickness, volume increase, and run-out distance. The results of this study demonstrate that the DAN3D model is highly applicable for numerical simulation of debris flows with extremely rapid velocities. However, additional research should be conducted on methods to estimate the initial volume, entrainment growth rate, and rheological parameters as input data in the DAN3D model for predicting debris flow hazards.

Key words : Debris flow, DAN3D, Entrainment, Rheology, Mt. Umyeon

요 지

본 연구에서는 2011년 7월 27일 서울 우면산에서 발생한 토석류 중 현장 관측 자료가 확보된 래미안, 신동아 유역의 사례를 통해서 DAN3D 모형의 적용성을 평가하고, 주요 입력변수인 연행증가율과 유변물성이 토석류 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 DAN3D 모형은 연행작용으로 인한 토석류 부피증가 현상을 합리적으로 모의하였으며, 토석류 유속 산정에 적합한 것으로 분석되었다. 또한, 매개변수 연구를 통해 연행증가율과 유변물성이 상호 복합적으로 토석류의 속도, 두께, 부피증가, 확산범위에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 본 연구결과를 바탕으로 우면산 토석류와 같이 매우 빠른 속도의 토석류 거동을 정량적으로 분석하기 위한 수치해석 모형으로서 DAN3D의 적용성이 높음을 확인하였다. 그러나 토석류 예측 모델링을 위해서는 DAN3D 주요입력변수인 초기부피, 연행증가율, 유변물성을 적절히 추정할 수 있는 연구가 필요하다.

핵심용어 : 토석류, DAN3D, 연행작용, 유변학, 우면산

1. 서 론

토석류는 경사가 급한 산지 및 계곡에서 물과 토석이 혼합되어 빠르게 흐르는 현상을 말하며, 국내의 경우 주로 국지성 집중호우에 의해 발생한다. 또한, 우리나라는 국토의

약 70%가 산지로 구성되어있는 지형특성과 연평균강우량의 절반 이상이 여름철에 집중되는 강우특성으로 인해 토석류 재해가 빈번히 발생한다. 기상청 기후통계분석자료(Korean Meteorological Administration, 2016)에 의하면 연평균 강수량은 점차적으로 증가하는 양상을 보이며, 특히 7월과 8월의

*정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정(E-mail: deukhwan@kaist.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST

**교신저자, 정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수(Tel: +82-42-350-3617, Fax: +82-42-350-7200, E-mail: srlee@kaist.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST

***정회원, 한국지질자원연구원 지질환경재해연구센터 박사후연구원(E-mail: jypark@kigam.re.kr)

Member, Post Ph.D., Geo-Environmental Hazard Research Center, KIGAM

강우량이 나머지 달에 비해 두드러지게 증가하고 있음을 나타내었다. 이는 토석류 발생에 직접적인 원인이 되는 여름철 강우량의 증가와 함께 토석류가 유발될 가능성이 증가함을 의미한다. 국내 토석류의 경우 빠른 유속, 큰 규모, 그리고 확산범위가 넓은 특성을 가지기 때문에 도로 유실 및 산지 철타 손상 등의 물적 피해가 야기된다. 특히, 도심지에서 발생하는 토석류는 경제적 손실과 더불어 심각한 인명피해를 초래한다. 2011년 7월 27일 서울 우면산에서 발생한 토석류를 대표적인 예로 들 수 있으며, 토석류 발생 당일 강우량은 남현 관측소 기준 서울시 연간강우량의 약 27%에 해당하는 359 mm가 발생하였다. 이로 인해 155개의 산사태가 발생하였고, 대부분 토석류로 전이되어 산지 인근 건물 116채의 침수피해와 16명의 인명피해를 유발하였다(Yune et al., 2013). 이처럼 극한강우에 의해 유발되는 토석류는 심각한 인적·물적 피해를 동반하게 된다. 이러한 피해를 예방하고 저감하기 위해서는 토석류 거동을 정량적으로 분석하고 예측할 수 있는 연구가 필요하다.

국내에서는 수치해석 프로그램인 FLO-2D (Kim et al., 2013; Lee and Kim, 2013; Oh et al., 2013; Kang and Kim, 2014; Choi, 2018)와 Debris-2D (Chae et al., 2010; Choi, 2017; Park et al., 2018)를 활용하여 토석류 거동 분석 연구를 수행해 왔다. 그러나 해당 프로그램들은 토석류의 연행작용을 고려할 수 없으므로 국내 토석류의 부피증가 현상을 분석하기에 한계가 있으며, Kim et al. (2013)이 언급한 바와 같이 FLO-2D를 이용한 우면산 토석류 모델링 결과가 관측된 토속류 속도보다 과소평가함을 보고하였다. 따라서 국내 토석류를 적절히 모의하기 위해서는 연행작용과 빠른 속도를 고려할 수 있는 수치해석 프로그램의 활용이 필요하다.

본 연구에서는 토석류의 연행작용을 고려하기 위해 토석류 유동해석 프로그램인 DAN3D를 활용하였다. 국내 토석류 분석의 적용성을 검토하기 위하여 CCTV, 블랙박스, 휴대폰 동영상 등을 통해 토석류 속도가 현장 관측된 우면산 래미안 유역과 신동아 유역의 토석류 거동 분석을 수행하였다. 또한, DAN3D의 주요 입력변수인 연행증가율과 유변물성의 매개변수 분석을 통해서 토석류 부피, 두께, 속도, 확산범위 등의 거동 특성 변화를 분석하였다. 이러한 연구결과를 토대로 향후 DAN3D를 활용한 토석류 분석 시에 활용 가능한 참고 자료를 제공하고자 한다.

2. DAN3D 프로그램

2.1 지배방정식

DAN3D에서는 유체보다 복잡한 유동특성을 가진 토석류를 모의하기 위해 반경험적(semi-empirical) 방법을 기반으로 등가흐름(equivalent fluid)의 개념과 연속체(continuum) 가정을 적용하였다(McDougall and Hungr, 2004). DAN3D의 지배방정식은 라그랑지안(Lagrangian) 계를 따르며, 질량

보존 방정식과 운동량 보존 방정식으로 구성되어있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho v = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho v \otimes v = -\nabla \cdot T + \rho g \quad (2)$$

여기서, ρ 는 체적밀도, t 는 시간, v 는 속도벡터, T 는 응력벡터, g 는 중력가속도벡터, ∇ 는 미분 연산자, $\cdot$ 는 내적, $\otimes$ 는 텐서 곱이다.

2.2 연행작용

연행작용은 토석류 바닥 물질의 침식에 따른 부피증가 현상으로 정의할 수 있다. DAN3D에서는 연행작용을 고려하기 위하여 Eq. (3)과 같이 토석류의 부피가 이동하는 거리에 따라 자연지수적으로 증가한다고 가정하였다.

$$E_s = \frac{\ln(V_f/V_o)}{S} \quad (3)$$

여기서, E_s 는 연행증가율, V_f 는 토석류 최종부피, V_o 는 토석류 초기부피, S 는 토석류 경로의 유하거리이다.

2.3 유변학적 모델

DAN3D에서는 다양한 구성 물질로 이루어진 토석류의 유동특성을 각 환경에 따라 적절히 적용할 수 있도록 5가지 종류의 유변학적 모델(Newtonian, Plastic, Bingham, Frictional, Voellmy)을 제공한다. 각 유변학적 모델들은 각기 다른 유동 특성을 가지지만, DAN3D에서는 모두 바닥면의 전단응력(basal shear stress)으로 표현되며, 토석류의 흐름방향과 반대 방향으로 작용하므로 항상 음의 값을 가진다. 실제 토석류는 비뉴턴유체로서 점소성 거동을 보이기 때문에 본 연구에서는 Bingham 모델을 활용하여 토석류를 모의하였다. Eq. (4)는 Bingham 모델의 구성방정식을 나타낸다.

$$\tau_{zx}^3 + 3 \left(\frac{\tau_{yield}}{2} + \frac{\mu_{Bingham} \bar{v}_x}{h} \right) \tau_{zx}^2 - \frac{\tau_{yield}^2}{2} = 0 \quad (4)$$

여기서, τ_{yield} 는 항복응력, $\mu_{Bingham}$ 는 점도, h 는 토석류 두께, $\bar{v}_x$ 는 흐름방향 평균속도이다.

3. 연구 대상 지역

본 논문의 연구 대상 지역은 우면산 북측에 위치한 래미안 유역과 신동아 유역으로 선정하였다(Fig. 1). 지반공학회, 대한토목학회 등 여러 기관에서 토석류 발생 직후 현장조사를 수행하였으며, 해당 지역의 지반 물성과 토석류로 인한

지형 변화 등 토석류 정량적 분석에 필요한 자료들이 상세히 기록되었다. 특히 래미안, 신동아 유역에서는 차량 블랙박스, CCTV, 휴대폰 동영상 등을 통해 토석류 현상이 관측되었으며, 이러한 관측 자료는 토석류 수치모의 시에 검증자료로서 유용하게 활용된다. 관측된 토석류 속도는 산지가 끝나는 지점부터 남부순환로를 건너는 지점까지의 거리와 이동시간을 측정하여 계산되었다. 그 결과 래미안 유역(Point A)과 신동아 유역(Point B)에서 각각 28, 18 m/s로 나타났으며(Fig. 2), 전 세계에서 보고된 토석류와 비교하여도 가장 빠른 속도를 보였다. 이러한 현상의 주요 원인으로는 많은 양의 강우가 유입되어 유동성이 커졌기 때문으로 추정할 수 있다.

래미안 유역과 신동아 유역에서는 각각 4개의 토석류 시작지점이 관측되었다. 각 지점별 토석류 발생 시기는 정확히 알 수 없지만 본 연구에서는 동시에 발생하였다고 가정하였다. 토석류의 초기 발생 부피는 우면산 조사보고서에서 기록된 시작지점의 파괴깊이와 토석류 발생 후의 정사영상에서 촬영된 파괴면적을 종합적으로 고려하여 도출하였으며, 그 결과 래미안 유역은 3,580 m³, 신동아 유역은 189.8 m³으로 산정되었다. 토석류 최종부피는 지점별 침식 깊이와 유하부의 폭, 그리고 흐름 경로의 길이를 이용하여 산정하였으며, 래미안 유역은 46,125 m³, 신동아 유역은 26,220 m³으로 추정하였다. 산정된 토석류 초기부피와 최종부피를 비교하면 래미안 지역의 경우 토석류 부피가 약 13배 증가하였으며, 신동아 지역의 경우 약 138배 증가한 것으로 확인되었다. 토석류 유하거리는 발생원 별 상이하지만 두 지역 모두 최대 608 m 내외로 관측되었다.

Fig. 1. Target Area Marked with a Red Dotted Box (Point A: Raemian region, Point B: Sindonga region)

Fig. 2. Flow-path Marked by the Yellow Line of the Study Area

4. DAN3D 모형 적용 방법

DAN3D 모형에서는 토석류 모델링을 위한 입력자료로써 토석류 발생 전의 지형자료, 연행증가율, 유변물성, 흙의 기본물성을 필요로 한다. 본 절에서는 이러한 입력자료의 획득 및 전처리과정을 소개하였다.

4.1 지형자료 생성

토석류가 발생하기 전 지형자료를 획득하기 위해 국토지리정보원에서 제공하는 수치지도를 활용하였으며, ArcMap (10.6.1 version) 래스터 분석을 통해 1 m × 1 m 해상도의 DEM을 생성하였다. 또한, 토석류 피해 범위에 내에 있는 건물들을 지형자료에 반영하기 위하여 국가공간정보포털에서 제공하는 연속수치지형도 기반의 건물중합정보를 활용하였다. 최종적으로 건물이 고려된 DEM 자료는 DAN3D 모형 입력자료 형태인 grid 파일로 변환하기 위하여 Surfer 프로그램의 크리깅 보간법을 적용하여 생성하였다(Fig. 3).

4.2 연행증가율 산정

앞서 소개한 바와 같이 DAN3D에서는 Eq. (3)을 통해 과거 토석류 발생지역의 연행증가율 산정이 가능하다. 또한, 침식 발생지역을 특정할 수 있으며, Fig. 3(c)와 같이 침식 발생 영역과 미발생 영역으로 구분하여 입력할 수 있다. 본 연구에서는 산지로 구분이 가능한 지역까지 침식이 발생 가능하다고 가정하였으며, 두 지역의 연행증가율은 Table 1과 같다.

Yoon et al. (2015)은 토석류 발생 예상 지역의 연행증가율 예측을 위해 간단한 지형 및 지반조건을 활용하여 Eq. (5)를 제안한 바 있으며, DAN3D 모형 기반의 토석류 예측 모델링 시에 활용될 수 있다.

$$E_{s_{model}} = 0.04717 - \frac{0.000148}{d50} - 0.002246 \ln(L \cdot B_{30}) \quad (5)$$

여기서, $d50$ 는 중간입도, L 는 유하거리, B_{30} 는 유역 내 사면 경사가 30% 이상인 지역의 면적을 나타낸다.

Table 1. Results of the Estimated Entrainment Growth Rate of the Study Area

Properties	Region	
	Raemian	Sindonga
Initial Volume (m ³)	3580	189.8
Final Volume (m ³)	46125	26220
Maximum Path Length (m)	606.7	609.6
Growth Rate (%/m)	0.00421	0.00808

Fig. 3. Grid Files Used for DAN3D Modeling in [upper] Raemian and [lower] Sindonga Region

4.3 유변물성 산정

본 연구에서 활용된 Bingham 모델의 입력변수인 항복응력과 점성을 고려하기 위하여, Kang et al. (2017)이 제안한 우면산 지역의 체적농도에 따른 Bingham 모델 Eqs. (7)과 (8)을 활용하였다.

$$C_v = \frac{\text{Volume of the sediment}}{\text{Volume of the sediment water}} \quad (6)$$

$$\tau_{yield} = 6 \times 10^{-8} \times e^{49.64 C_v} \quad (7)$$

$$\mu_{Bingham} = 8 \times 10^{-11} \times e^{53.83 C_v} \quad (8)$$

여기서, C_v 는 유사체적농도이다. Pierson and Costa (1987)는 토석류와 고농도류(hyperconcentrated streamflow)의 개념을 도입하여 유사체적농도가 각각 60% 이상, 20~60%를 가진다고 하였다. 그러나 본 연구에서는 고농도류의 개념을 토석류에 포함하였으며, 발생 당시의 강우 조건을 고려하여 유사체적농도 값들을 산정하였다. 본 연구에 적용된 유사체적농도에 따른 항복응력과 점성 값은 Table 2와 같다.

Table 2. Bingham Model Parameters used in this Study

Volumetric Concentration of Sediments		Properties	
		Yield stress (Pa)	Viscosity (Pa · s)
Case 1	0.425	87.19	0.43
Case 2	0.4	25.21	0.18
Case 3	0.375	7.29	0.05
Case 4	0.35	2.11	0.01

4.4 지반 물성

토석류가 발생한 흙의 기본물성은 대한토목학회 조사단이 구축한 현장조사 및 실내시험 자료와 Park et al. (2016)이 구축한 자료를 활용하였다. 또한, 토석류 연행작용으로 인한 지반의 최대 침식 깊이는 우면산 산사태 원인조사 추가 및 보완조사 보고서(Korean Society of Civil Engineers, 2012)를 활용하여 산정하였다. 이를 요약하면 Table 3과 같다.

Table 3. Basic Soil Properties and Maximum Erosion Depth in the Study Area

Properties	Region	
	Raemian	Sindonga
Unit Weight (kN/m ³)	18.5	18.1
Internal Friction Angle (°)	22.4	25.3
Maximum Erosion Depth (m)	4	4

5. 결과 분석

본 연구에서는 우면산 래미안, 신동아 지역에서 발생한 토석류의 정량적 분석을 위하여, 4절에서 소개한 바와 같이 DAN3D 모형 적용에 필요한 입력자료를 바탕으로 수치해석을 수행하였다.

5.1 유변물성에 따른 토석류 거동 분석

Fig 4는 유변물성에 따른 토석류의 속도를 분석한 결과를 나타낸다. 해석결과의 일관성을 위해 각 케이스 별 해석시간 (Simulation time)을 50초로 설정하였다. 그 결과 유사체적농도가 낮을수록 토석류의 속도가 높아졌고, 확산범위가 증가하였다. 또한, 유변물성이 일정 값 이하로 감소하기 전에는

Fig. 4. Velocity Profile of Debris Flow (plotted in particle type) with Volumetric Concentration of Sediments in [upper] Raemian and [lower] Sindonga Region

토석류로 전이되지 않음을 확인하였으며(Fig. 4(a)), 토석류로 전이 되더라도 유변물성이 충분히 감소되지 않는 경우 흐르는 도중 퇴적되는 것을 확인하였다(Fig. 4(b)). 4가지 Case의 해석결과 Cases 3과 4가 Point A와 B에서 관측된 토석류 속도 값과 가장 근사한 결과를 보였다.

Fig. 5는 유변물성 별 토석류 최대 두께를 분석한 결과를 나타낸다. Cases 1과 2는 앞서 설명한 바와 같이 토석류로 전이되지 않거나, 흐르는 도중 퇴적되었다. 반면, Cases 3과 4는 토석류가 산지 아래까지 도달하였고, 침식 발생이 가능한 산지 하단부까지 토석류 두께 증가하였다. 래미안 지역의 경우 Cases 3과 4의 토석류 두께 값이 서로 차이를 보이지 않았으나, 신동아 지역의 경우 유사체적농도가 낮을수록 토석류 두께가 증가하였다. 이러한 이유는 신동아 유역의 평균 경사(12.8°)가 래미안 유역 평균 경사(19°)보다 완만하여 흐르는 도중 일부 토사가 퇴적되었기 때문으로 판단된다. 즉, 유변물성은 토석류의 두께 변화에 영향을 주며, 경사가 급한 곳보다 완만한 곳에서 영향력이 커지는 것으로 분석되었다.

래미안 지역과 신동아 지역의 유변물성에 따른 토석류 정량적 해석결과는 각각 Case 3, Case 4에서 토석류 속도, 두께 실측값과 유사한 결과를 보였다(Table 4). 그러나 토석류 최종부피 값은 두 지역 모두 과소평가하였는데, 이러한 이유는 토석류 유하거리(path length) 산정 시에 가장 높은

지점의 발생원(initial source)에서부터의 거리로 측정하여 연행증가율 값을 과소평가되었기 때문이다. 실제 토석류 발생원은 두 유역 모두 4개 지점으로 구성되어 있으며, 각 지점별 유하거리가 다른 것을 고려하지 못하였기 때문에 토석류 최종부피를 과소평가하였다. 따라서 발생원이 2개 이상인 토석류의 연행증가율을 얻기 위해서는 시행착오법(trial and error)을 통한 역산 과정이 필요하다.

5.2 연행증가율에 따른 토석류 거동 분석

본 절에서는 래미안 지역(Case 3)과 신동아 지역(Case 4) 토석류 모델링에 사용되었던 유변물성 값을 고정한 후, 연행증가율 값의 매개변수 연구를 수행하여 연행증가율에 따른 토석류 거동을 분석하였다.

Fig. 6은 연행증가율에 따른 토석류 최종부피의 변화를 나타내며, 연행증가율이 증가함에 따라 최종부피는 자연지수적으로 증가하였다. 각 지역의 연행증가율에 따른 부피증가량은 Eq. (3)을 변환하여 Eq. (9)의 지수함수식으로 표현이 가능하다.

$$V_f = V_o \times e^{\bar{SE}_s} \quad (9)$$

여기서, V_f 는 토석류 최종부피, V_o 는 초기부피, E_s 는 연행

Fig. 5. Maximum Thickness Profile of Debris flow (plotted in grid type) with Volumetric Concentration of Sediments in [upper] Raemian and [lower] Sindonga Region

Table 4. Results of Quantitative Analysis of Debris Flow

Results	Region			
	Raemian (Case 3)		Sindonga (Case 4)	
	Observed Value	Estimated Value	Observed Value	Estimated Value
Velocity (m/s)	28	27.2	18	17.5
Thickness (m)	3~4	3.3	2~3	2.8
Final Volume (m ³)	46,125	34,200	26,220	22,310

Fig. 6. A Graph of the Change in the Final Volume of Debris Flow with Respect to the Entrainment Growth Rate

증가율, 그리고 $\bar{S}$ 는 토석류 평균 유하거리이다. 이를 토대로 래미안 지역과 신동아 지역의 평균 유하거리를 역산한 결과 각각 522.9 m, 590.6 m로 계산되었다. 또한, 토석류 실측값을 대변하는 연행증가율은 각각 0.00489%/m와 0.00834%/m로 나타났다.

Fig. 7은 연행작용을 고려하지 않고 토석류 모델링을 한 결과를 나타내며, 토석류 부피 및 두께 증가 현상을 모의하지 못함을 확인하였다. 또한, 토석류 속도는 매우 빠른(최대 64 m/s) 것으로 분석된 반면 토석류 두께는 16 cm 이하의 매우 얇은 형태로 흐르는 것을 확인하였다. 특히, 신동아 지역의 토석류는 실측된 경로(계곡부)를 따르지 않고 사면 수직 방향으로 흐름을 확인하였다. 이는, 토석류 발생 후 사면 아래로 흐를 때 침식작용으로 인한 저항을 받지 않았기 때문으로 판단된다. 즉, 연행작용은 토석류의 두께, 부피, 속도, 흐름방향 등 전반적인 토석류 거동에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 7. Results of Modeling of the Debris Flow Without Taking Into Account the Entrainment in [upper] Raemian and [lower] Sindonga Region

6. 결 론

본 연구에서는 2011년 7월 27일에 서울 우면산에서 발생된 토석류 중 현장 관측 자료가 확보된 래미안, 신동아 유역의 토석류의 정보를 바탕으로 DAN3D 모형을 이용한 수치해석을 수행하였으며, 해당 모형의 국내 적용성을 검증하였다. 또한, 매개변수 연구를 통해 주요입력 변수인 유변물성과 연행증가율에 따른 토석류의 거동 특성을 분석하였으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 우면산 지역 풍화토의 유사체적농도에 따른 유변물성 값을 DAN3D 모형에 적용해 본 결과 유사체적농도가 낮을수록 토석류의 속도가 높아지고 확산범위가 넓어지는 경향을 보였으며, 반대로 유사체적농도가 높은 경우 토석류로 전이 되지 않거나 흐르는 도중 퇴적되는 경향을 보였다. 즉, 유변물성이 토석류의 유동성에 큰 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다. 또한, 충분한 양의 강우가 유입되어야 토석류가 발생할 수 있는 조건임을 유추할 수 있다.
- (2) 최대 유하거리를 통해 연행증가율 산정 시 토석류 최종부피 값을 과소평가하는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 본 연구대상 지역의 토석류와 같이 발생원이 2개소 이상일 경우 각 발생원의 유하거리를 고려하지 않았기 때문이다. 따라서, 발생원이 2개소 이상인 지역의 토석류 해석 시에는 시행착오법을 통해 연행증가율을 추정해야 한다.
- (3) 연행증가율 매개변수 연구를 수행한 결과 연행증가율이 증가할수록 토석류 부피가 자연지수적으로 증가함을 확인하였다. 또한, Eq. (8)을 통해 도출된 래미안, 신동아 지역의 평균 유하거리는 각각 522.9 m, 590.6 m로 산정되었으며, 각기 다른 발생원의 유하거리를 고려하여 평균 유하거리를 산정하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- (4) DAN3D 모형을 적용하여 토석류 발생 당시의 유변물성과 연행증가율을 역산한 결과 래미안 지역의 항복응력, 점성, 연행증가율은 각각 7.29Pa, 0.05Pa·s, 0.00489%/m 이고 신동아 유역의 경우 2.11Pa, 0.01Pa·s, 0.00834%/m 인 것으로 나타났다. 이는 같은 지반 물성을 가지고 있더라도 지형에 따라 토석류 발생 조건이 다르다는 것을 나타낸다.
- (5) 토석류 해석 시 연행작용을 무시할 경우 토석류의 진행경로 및 토석류 속도, 두께, 부피 등의 정량정보를 제대로 평가할 수 없음을 확인하였다. 즉, 토석류 모델링 시 연행작용을 합리적으로 고려해야 한다.

본 연구결과는 우면산 래미안, 신동아 유역과 유사한 지반, 지형조건에서의 토석류 예측 모델링 시에 입력 인자의 산정

에 참고자료로 활용될 수 있으며, 토석류 방재 연구에 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 마지막으로 토석류 예측 모델링을 위해서는 더욱 많은 지역에서 토석류 초기부피 및 연행증가율 산정, 유변물성 분석이 필수적이며, 이를 바탕으로 주요입력 변수를 추정할 수 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구실지원사업의 지원(NRF-2018R1A4A1025765) 및 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(19CTAP-C143742-02)을 받아 수행되었습니다.

References

- Chae, B.G., Liu, K.F., and Kim, M.I. (2010). A case study for simulation of a debris flow with DEBRIS-2D at Inje, Korea. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 20, No. 3, pp. 231-242.
- Choi, J. (2017). Analysis of debris flow of Chun-cheon landslide area using numerical methods. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 27, No. 1, pp. 59-66.
- Choi, J.R. (2018). An analysis of debris-flow propagation characteristics and assessment of building hazard mapping using FLO-2D. *Crisisonomy*, Vol. 14, No. 2, pp. 91-99.
- Kang, H.S., Jeong, J.H., and Kim, Y.T. (2017). Rheological properties of weathered soil of debris flow disaster area with volumetric concentration of sediment. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 2, pp. 195-206.
- Kang, H.S., and Kim, Y.T. (2014). Physical vulnerability function of buildings impacted by debris flow. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 5, pp. 133-143.
- Kim, S., Paik, J., and Kim, K.S. (2013). Run-out modeling of debris flows in Mt. Umyeon using FLO-2D. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 3, pp. 965-974.
- Korean Society of Civil Engineers. (2012). *Research contract report: Addition and complement causes survey and restoration work of Mt. Umyeon landslide* (in Korean).
- Korean Meteorological Administration. (2016). *Climate statistical analysis report* (in Korean).
- Lee, M.J., and Kim, Y.T. (2013). Movement and deposition characteristics of debris flow according to rheological factors. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 29, No. 5, pp. 19-27.
- McDougall, S., and Hungr, O. (2004). A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, No. 6, pp. 1084-1097.
- Oh, K.D., Lee C.H., Kang, B.H., Heo, J.Y., and Hwang, S.B. (2013). A methodology to analyse landslide and debris-flow hazards due to heavy rainstorms: Application on the damage areas around Woomyon Mountain. *Crisisonomy*, Vol. 9, No. 9, pp. 45-66.
- Park, J.Y., Lee, S.R., Lee, D.H., and Choi, G.M. (2018). A study of the combination of risk analysis with a citywide landslide early warning system. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, Vol. 121, No. 11, pp. 21-31.
- Park, D.W., Lee, S.R., Vasu, N.N., Kang, S.H., and Park, J.Y. (2016). Coupled model for simulation of landslides and debris flows at local scale. *Natural Hazards*, Vol. 81, No. 3, pp. 1653-1682.
- Pierson, T.C., and Costa, J.E. (1987). A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. In J.E. Costa and G.F. Wieczorek (Eds.), *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation* (pp. 1-12). Reviews of Engineering Geology, Vol. 7, Boulder, CO: Geological Society of America.
- Yoon, S., Lee, S.R., Park, J.Y., Seong, J.H., and Lee, D.H. (2015). A prediction of entrainment growth rate for debris-flow hazard analysis using multiple regression analysis. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 6, pp. 353-360.
- Yune, C.Y., Chae, Y.K., Paik, J., Kim, G., Lee, S.W., and Seo, H.S. (2013). Debris flow in metropolitan area – 2011 Seoul debris flow. *Journal of Mountain Science*, Vol. 10, No. 2, pp. 199-206.

Received	April 1, 2019
Revised	April 4, 2019
Accepted	May 8, 2019