

FLO-2D를 이용한 고속도로에서의 토석류 거동 모델링

임재태* · 김병현**

Lim, Jae-Tae*, Kim, Byunghyun**

Modeling for Debris Flow Behavior on Expressway Using FLO-2D

ABSTRACT

This study demonstrates the applicability of the FLO-2D for the influence analysis of the debris flow on expressway. To do this, the behavior of debris flow on the expressway was reproduced by applying the FLO-2D to actual generated debris flow. The study area is a part of the Deokyusan Service Area on the Daejeon-Jinju Expressway, where traffic was blocked for 24 hours due to the debris flow in August 2005. Geographical analysis with GIS, hydrological analysis with HEC-HMS, and estimation of the amount of debris flow were carried out using field survey and soil property test data. Then, the optimum parameter combination of FLO-2D was selected through the parameter sensitivity analysis, and the behavior analysis of debris flow on expressway was applied. The comparison of the predictions with the observations shows the availability of FLO-2D for the behavior analysis of debris flow on the expressway.

Key words : Debris flow, Expressway damage, FLO-2D, Parameter estimation

초 록

본 연구는 실제 고속도로 인접지역에서 발생한 토석류를 대상으로 고속도로에서의 토석류 거동을 FLO-2D 모형을 적용하여 재현함으로써, 고속도로에서의 토석류 영향 해석에 대한 FLO-2D 모형의 활용성을 검증하고자 하였다. 대상구역으로는 2005년 8월 집중호우로 토석류가 발생하여 24시간 동안 교통이 차단된 대전-진주간 고속도로의 덕유산 휴게소구간으로 선정하였다. 발생 토석류에 대한 현장조사 및 토성 시험분석 자료를 활용하여 GIS를 이용한 지형분석, HEC-HMS를 이용한 수문분석, 그리고 토석량을 산정하였다. 그리고 나서 FLO-2D 모형의 매개변수 민감도 분석을 통한 최적 매개변수 조합을 선정 후, FLO-2D 모형을 적용한 토석류 거동해석을 수행하였다. 모형의 예측치와 실측자료와의 비교·분석을 통하여 고속도로에서 토석류 거동해석을 위한 FLO-2D 활용 가능성을 보여주었다.

검색어 : 토석류, 고속도로 재난, FLO-2D, 매개변수 추정

1. 서론

방재에 대한 국내의 관심이 증가하고 산사태와 토석류의 차이점이 점차 알려지기 시작하면서 토석류에 대한 관심은 2000년 이후 점차 커지게 되었다. MOLIT(2007)는 산악지 도로설계 매뉴얼을 발간하여 산악지 구간의 도로설계 기준을 제시하였으나 토석류 관련 내용은 부족하였고, 토석류에 대한 본격적인 연구는 2011년 우면산 산사태 이후부터 활발하게 진행되었다. Choi and Paik(2012)는 토석류의 이동거리 특성을 강원지역의 사례를 기초로 하여 Sled 모형(Heim, 1932)을 사용한 토석류의 순효율에 대하여 연구하였고, Lee et al.(2012)은 산사태 및 토석류의 영향을 받는 도시 인근지를 대상으로 수치지형도를 활용하여 경사도, 상부사면 기여면적, 습윤지수를 파악하고 지형요소 분석에 의한 산지 수계의 집중도를 예측함으로써 지형요소를 고려한 토석류의 위험도 예측에 관하여 연구하였다.

* 한국도로공사 차장 (Korea Expressway Corporation · ijt@ex.co.kr)

** 종신회원·교신저자·행정안전부 국가민방위재난안전교육원 교수 (Corresponding Author · Ministry of the Interior and Safety · bhkimc@korea.kr)

Received February 11, 2019/ revised March 4, 2019/ accepted March 6, 2019

Kim et al.(2013)은 FLO-2D 모형(O'Brien, 2018)을 이용하여 우면산에서 발생한 토석류에 유동을 해석하여 당시 촬영된 동영상 자료 및 현장조사 자료에 근거하여 토석류에 대한 유동 매개변수들을 산정하였으며, 이들 매개변수를 이용하여 발생한 토석류 거동에 대한 검증을 시행하였고, Lee et al.(2015)은 토석류 거동에 영향을 미치는 다양한 인자에 대한 토석류 흐름 특성을 분석하고 그 결과에 의한 통계적 추론 분석을 활용하여 주요 인자간의 민감도 분석을 수행하였다. FLO-2D 모형을 이용한 토석류 해석에 대한 국외 연구의 경우로, Lin. et al.(2011)은 대만 Song-Her 지역에서 발생한 토석류를 모의를 통해 조도계수가 증가하면 토석류의 이동거리가 감소하고 최대 퇴적 깊이가 증가함을 보여주었고, Meyer et al.(2015)는 노르웨이 도로의 교통량과 토석류 발생 확률을 이용하여 토석류 발생 시 교통량 우회 방안을 제시하였다.

하지만, 토석류에 관한 연구는 앞서 언급한 연구들을 포함하여 대부분이 산악지형이 중심이며, 고속도로에서의 토석류 영향과 거동에 관한 연구는 거의 이루어지고 있지 않다. 2006년 7월 영동고속도로 평창휴게소 인근에서 대규모 토석류 피해가 발생함으로써 토석류의 위험성 및 피해의 심각성이 알려져 다음해인 2007년 이후 한국도로공사 도로교통연구원(KECRI)을 중심으로 토석류 방재를 위한 연구가 시작되었다(KECRI, 2007a, 2008, 2010). 하지만, 지금까지의 KECRI를 통한 토석류 연구의 주된 방향이 기존 발생한 토석류 사례에 대한 통계분석을 통하여 위험등급을 분류하는데 있었으며, 수문분석 및 수치 모델링을 통한 토석류의 거동에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 2005년 8월 집중호우 시 대전-진주간 고속도로의 덕유산 휴게소구간에서 발생한 토석류에 대한 현장조사 및 토성 시험 분석 자료를 활용하여, GIS (Geographical Information System)를 이용한 지형분석, HEC-HMS (Hydrologic Modeling System)를 이용한 수문분석, 토석류 유출량 산정, 그리고 FLO-2D 모형을 적용한 거동해석을 수행하였다. 또한, 연구유역의 매개변수 민감도 분석을 통해 선정된 FLO-2D 모형의 최적 매개변수로 실제 토석류 거동을 재현함으로써, 고속도로에서의 토석류 영향 해석에 대한 FLO-2D 모형의 활용 가능성을 보여주었다.

2. 적용 모형 및 기본 이론

2.1 적용모형

본 연구에서는 토석류 거동 해석 모형을 위하여 FLO-2D 모형을 적용하였다. FLO-2D 모형은 FEMA(Federal Emergency Management Agency, 미국 연방재난관리청)가 승인한 하천흐름과 홍수 해석을 위한 수리학 모형으로 FDM(Finite Difference Method, 유한차분법)을 이용하여 하도-홍수터 흐름 교환, 건물로 인한 저류

손실흐름 방해, 제방 붕괴, 침전 토사 이송 모의, 고농도 토사흐름, 세류 및 협곡 흐름, 강우 및 침투 등의 해석이 가능하며, 홍수 추적에 필요한 다양한 기능을 가지고 있다. 고농도 토사흐름 해석에서는 정방향 격자를 적용하여 점성력, 발생에너지, 난류 및 분산에너지 조건 등을 토사농도의 함수를 포함한다.

2.2 해석 이론

O'Brien et al.(1993)은 토석류 거동을 해석하기 위하여 2차원 유한차분법을 적용하였다. 토석류 거동 해석을 위해 제시한 2차원 연속 및 운동량 방정식은 Eqs. (1) and (2)와 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} + \frac{\partial h V_y}{\partial y} = i \tag{1}$$

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \tag{2a}$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \tag{2b}$$

여기서, h = 수심, V_x , V_y = 평균 수심에서의 x , y 축으로의 속도, i = 강우강도, S_{fx} , S_{fy} = 마찰 경사, S_{ox} , S_{oy} = 바닥 경사이다.

일반 유체와 달리 고밀도인 토석류 전단응력은 Eq. (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + C \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \tag{3}$$

여기서, η = 점성계수, $\tau_y = \tau_c + \tau_{mc}$ (τ_c = 점착 항복 응력, τ_{mc} = Mohr-Coulomb 전단력), $C = \rho_m l^2 + f(\rho_m, C_v) d_s^2$. 토석류의 농도(c_v)는 O'Brien and Julien(1985)이 제안한 농도에 따른 구분 방법으로 구할 수 있다.

토석류가 발생하는 조건의 마찰경사는 Eq. (4)로 산정할 수 있다.

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} \tag{4}$$

여기서, S_f = 전체 마찰 경사, S_y = 항복 경사, S_v = 점성 경사, S_{td} = 난류 분산 경사이 식에서 항복경사인 S_y 는 Eq. (5), 점성경사인 S_v 는 Eq. (6)으로 계산할 수 있다.

$$S_y = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} \tag{5}$$

$$S_v = \frac{K}{8} \frac{\eta}{\gamma_m} \frac{V}{h^2} \quad (6)$$

항복응력(τ_y)과 점성계수(η)는 유역의 지형 및 토질 조건에 따라 O'Brien(1986)이 16가지 종류를 제안한 Table 1으로 결정되며, 층류저항계수(K)는 지표면 조건에 따라 Table 2로 결정한다.

3. 연구유역 및 자료

3.1 연구유역

본 연구에서는 토석류 거동을 해석하기 위해 2005년 8월 3일

토석류가 발생한 대전-진주간 고속도로의 덕유산구간을 연구유역으로 선정하였다. 대전-진주간 고속도로 덕유산 구간은 2005년 8월 3일 00시-11시까지 총 234 mm의 강우량 및 시간당 최대 54 mm에 달하는 집중호우로 인하여 도로 인접부의 산지에서 발생한 토석류가 고속도로로 유입되어 이 구간의 교통이 24시간 동안 전면 차단되었다. Fig. 1은 연구유역을 보여주며, 토석류는 크게 4개의 계곡에서 발생되어 암석, 토사, 나무를 유실시키고 쓸려 내려와 배수시설을 막아 버렸고 이로 인해 토사 및 암석이 도로로 유입되는 결과를 초래하였다. 이 당시 대전-진주간 고속도로에서는 총 7개 지점에서 토석류가 발생하였으나, 본 연구에서는 덕유산휴게소 구간에서 근접하여 발생한 대전-진주간 고속도로

Table 1. Yield Stress(τ_y) and Viscosity(η) (O'Brien, 1986)

Source	$\tau_y = \alpha e_v^{\beta C}$ (dynes/cm ²)		$\eta = \alpha e_v^{\beta C}$ (poises)	
	α	β	α	β
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
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.(1980)	0.00136	21.2	-	-
	0.050	15.48	-	-
Chien and Ma(1958)	0.0588	19.1-32.7	-	-
Fei(1981)	0.166	25.6	-	-
	0.00470	22.2	-	-

Table 2. Resistance Parameter for Laminar Flow (Woolhiser, 1975; O'Brien, 2018)

Surface	Range of K
Concrete/asphalt	24 - 108
Bare sand	30 - 120
Graded surface	90 - 400
Bare clay-loam soil, eroded	100 - 500
Sparse Vegetation	1,000 - 4,000
Short prairie grass	3,000 - 10,000
Bluegrass sod	7,000 - 50,000



Fig. 1. Study Area

Table 3. Rainfall at Deogyu Mountain on August 3, 2005

Time (hr)	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
Hourly rainfall (mm)	1	4	54	22	17	12	38	47	21	17	1
Accumulative rainfall (mm)	1	5	59	81	98	110	148	195	216	233	234

상행방향으로 145.6 km, 145.9 km, 146.0 km, 146.05 km의 4개 지점에 대하여 분석을 실시하였다.

3.2 문헌조사 자료

본 연구에서는 KECRI에서 사고 발생 6일 후 사고 발생 당시 근무 직원들의 면담자료를 포함한 현장조사 자료(KECRI, 2005), 토석류 발생구간 및 이동구간에 대한 조사 및 측량 자료(KECRI, 2007b) 그리고 사진 300여장과 동영상 등을 기초로 퇴적 토사의 양, 퇴적 범위, 퇴적형상 등을 취합하였다. 토석류로 인한 고속도로 기능마비 초래 토사량은 5,000 m³으로 조사되었으며, 현장 피해 및 복구사진 그리고 토석류 퇴적범위 및 현황은 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보여주듯이, 대부분의 토석류가 고속도로 중앙분리대에 걸쳐 도로 우측에 퇴적되거나 도로 성토부와 계곡이 이루는 협곡부에 퇴적되고 나머지는 아래쪽으로 흘러 농경지로 유출되고 중앙분리대를 넘어 도로 좌측에 퇴적된 토석류의 양은 미미하였음을 알 수 있다.

또한 Fig. 2에서 고속도로 위에 퇴적된 토석의 높이가 위치별로 많은 차이가 있음을 알 수 있고, 토석류가 고속도로에 미치는 영향을 분석하는 본 연구에서는 고속도로상에 퇴적된 퇴적물의 양 및 퇴적 높이가 가장 중요한 검증자료 중 하나이다. 본 연구에서 문헌 조사한 토석류 퇴적 높이도 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 보여주듯이, 퇴적물의 높이는 위쪽에서부터 서서히 높아지다가 146.1 km

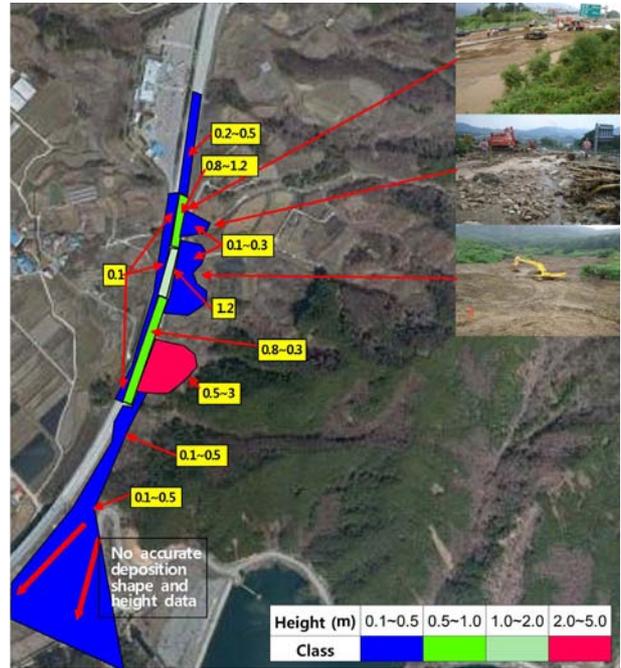


Fig. 2. Investigated Deposition Status for Debris Flow on August 3, 2005

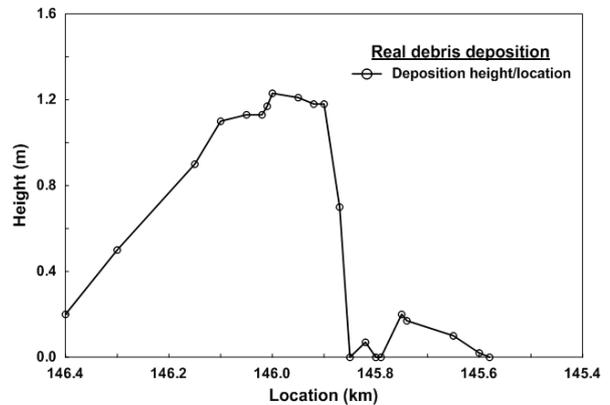


Fig. 3. Observed Deposition Height

지점에서부터는 1.0 m이상이 되고 146 km 지점에서는 1.2 m정도가 되어 중앙분리대 상단높이(1.27 m)에 거의 근접함을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 2에서 보여주는 사진으로도 확인이 가능하다. Figs. 2 and 3은 토석류 거동해석의 기초자료로 본 연구에서 매개변수의 민감도 분석 및 모형의 검증에 사용하였다.

3.3 지형 및 수문 분석

토석류 거동해석을 위한 지형분석은 국토지리정보원의 1/5,000 수치지도를 Arc-GIS를 이용하여 3차원 지형분석을 실시하였다. 그리고 나서, 지형분석 결과와 Table 3의 강우량 자료를 이용하여

Table 4. Computed Runoff from HEC-HMS

Time (hr)	Runoff (m ³ /s)			
	146.05 km	146.0 km	145.9 km	145.6 km
01:00	0.0	0.0	0.0	0.0
02:00	0.0	0.0	0.0	0.0
03:00	0.2	0.0	0.0	0.1
04:00	0.4	0.1	0.1	0.2
05:00	0.6	0.1	0.1	0.2
06:00	0.5	0.2	0.1	0.2
07:00	0.8	0.1	0.2	0.3
08:00	1.5	0.2	0.3	0.6
09:00	1.5	0.4	0.3	0.6
10:00	1.1	0.4	0.2	0.2
11:00	0.6	0.3	0.1	0.1
12:00	0.2	0.2	0.1	0.0
13:00	0.1	0.0	0.0	0.0
14:00	0.0	0.0	0.0	0.0

4개 유역에 대한 수문분석을 실시하였다. 수문분석에 앞서 토양도와 토지이용도 분석을 수행하여 평균 유출곡선지수(CN)를 산정하고 HEC-HMS를 이용하여 유출수문곡선을 산정하였다. HEC-HMS에서 형성된 4개의 유역은 Fig. 1에서 검은색 진한 실선으로 보여주며, 이 결과는 KECRI(2007b)에서 수치지도를 이용하여 구분한 토석류 발생 유역도와 매우 유사한 결과를 보여준다. 구분된 4개의 유역은 면적차이를 가지며, 유역면적 차이로 HEC-HMS으로부터 산정된 토석류 발생 4개 유역의 유출량은 Table 4에서 보여준다. 침투유출량의 최대값인 146.05 km의 1.5 m³/s은 최소인 145.9 km의 0.3 m³/s와 5배의 차이가 있다. 침투 유출량의 차이는 토석류의 농도차이를 유발할 수 있으며, 이러한 농도차이를 거동해석에 적용하였다.

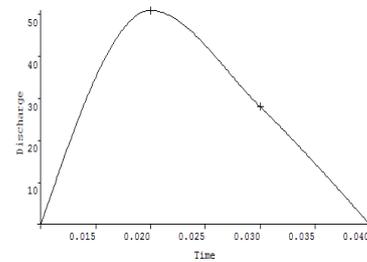
3.4 토석류 유출량 산정

FLO-2D를 이용한 토석류 거동해석 모의를 위해서는 수문분석 결과와 직접 연계한 모의는 할 수는 없고 토석류 발생량을 별도로 산정하여 FLO-2D의 토석류 발생부에 유출량으로 입력하여야 한다. 본 연구에서 토석류 유출량 산정은 KECRI(2008)의 “고속도로 토석류 대책 설계 지침”에 제안한 4가지 방법 중에서 KECRI(2007b)의 현장조사 자료가 적용가능한 방법인 “토석류가 이동하는 계곡의 길이, 계곡에서의 침식퇴적 심도, 계곡단면적을 이용하여 계산한 토석량” 방법을 적용하였다. 이 방법에 의한 토석류 계산은 Eqs. (7) and (8)로 산정한다.

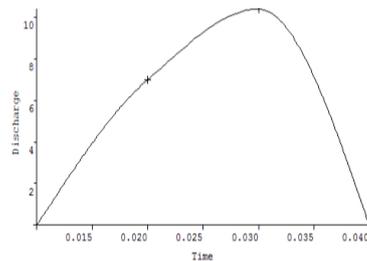
$$V_t = \sum V_i + \sum V_e \tag{7}$$

Table 5. Amount of Debris Flow by Generation Part

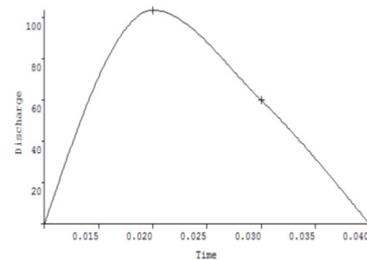
Highway location (km)	Total amount of debris flow (m ³)	Generation point (Fig. 1)	Amount of debris flow (m ³)
146.05	2,752	A	2,752
146.0	4,728	B	2,750
		C	1,234
		D	180
		E	564
		F	1,522
145.9	2,706	G	1,184
145.6	7,988	H	5,592
		I	2,396



(a) A



(b) E



(c) I

Fig. 4. Time-Distributed Amount of Debris Flow

$$V_t = \sum V_i + \sum(L_i \times B_i \times Y_i) \tag{8}$$

여기서, V_t =기준 지점에서의 총유출토석량(m³/s), V_i =초기 붕괴토석량(m³/s), V_e =계곡부에서 침식된 토석량(m³/s), L_i =계곡의 침식 구간 길이(m), B_i =계곡의 폭(m), Y_i =계곡의 침식두께(m)이다.

본 연구에서는 KECRI(2007b)에서 실시한 토석류 발생구간 상세 조사에서 조사된 자료를 이용하여 토석류 유출량을 계산하고, 발생 시점별 유출량을 Table 5 및 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 시간을 고려한 유출량은 Table 5의 유역별 총유출량을 토석류 발생시 유출속도 등을 가정하여 산정하였고, 9개의 발생 지점 중에서 A, E, H (Fig. 1)의 3곳만 나타내었다. 각 발생 지점에서 언제 토석류가 발생하였는지 정확한 시점은 확인되지 않지만, 일반적으로 고속도로로 토석류 발생은 대부분 비슷한 시점에 발생하는 것으로 조사되어 (KECRI, 2008), Fig. 4의 토석류 유출곡선은 이런 특성을 반영하여 적용하였다.

4. 토석류 거동 해석

본 연구에서는 토석류 거동해석을 위해 FLO-2D 모형을 이용하였으며, 모형에서 연구유역의 지형 및 흐름방향을 계산하기 위해 토석류가 발생한 지역 계곡부의 크기, 고속도로 폭(24 m), 영향 길이(1,500 m 내외) 등을 고려하여 6 × 6 m의 격자를 적용하였다. 3차원 지형분석 자료로는 고속도로와 중앙분리대의 명확한 구분이 힘들어 FLO-2D의 기능을 활용하여 중앙분리대의 위치 및 높이 (1.27 m) 등을 보정 처리하였다. 그리고 토석류가 발생한 시간에 대한 정확한 정보가 없어, 본 연구에서는 토석류가 발생한 4개 지점을 동시에 모의하여 퇴적물의 최종 형상 및 높이, 양 등을 비교하여 모형을 검증하였다.

4.1 최적 매개변수의 선정

4.1.1 지형 및 토질 조건

모형의 적용을 위한 항복응력(τ_y)과 점성계수(η)는 유역의 지형 및 토질 조건에 따라 결정된다(Table 1). 토성실험 결과로 알려진 본 연구유역의 토질은 실트질 모래와 점토질 모래로 이루어진

자연상태의 토질로(KECRI, 2007b), 산지에 위치한 계곡부 지형과 토질조건인 Aspen Natural Soil과 가장 부합하였다. 반면, Aspenwatershed는 일반적인 산지부에 적용이 가능한 조건이며, Glenwood 1은 낮은 구릉지에 나무 및 잔디 등이 있는 유출이 용이한 지형의 토질조건이다. Table 1에는 다른 13가지의 지형 및 토질 조건들이 제시되어 있으나, 연구유역과는 적합하지 않아 본 연구에서는 앞서 언급한 3가지 토질 조건에 대해서만 고려하였다.

Figs. 5(a) and 5(b)는 각각 Table 1에서 보여준 Aspen Natural Soil과 Aspenwatershed의 토질조건에 대한 항복응력과 점성계수를 적용하여 FLO-2D로 토석류의 거동을 해석한 결과를 보여준다. Glenwood 1의 적용 결과는 Aspenwatershed와 비슷하여 Fig. 5에 나타내지 않았다. Aspen Natural Soil 조건을 적용한 Fig. 5(a)는 Fig. 2의 조사된 실제 토석류 퇴적결과와 비교하면 중앙분리대의 차단효과와 중첩효과가 실제와 거의 유사하고 퇴적된 높이 또한 조사한 결과와 유사하다. 하지만, Aspenwatershed의 조건을 적용한 Fig. 5(b)는 토석류가 고속도로에 많이 퇴적되지 않고 중앙분리대를 월류하여 고속도로의 좌측 농경지와 민가쪽으로 향하는 것을 보여준다. 이 결과는 실제 토석류의 대부분이 고속도로 중앙분리대에 걸려 고속도로 좌측으로는 진행하지 못한 Fig. 2와는 큰 차이가 있다.

Fig. 6은 토질 및 지형조건에 따른 각 매개변수를 적용한 결과와 실제 퇴적높이를 비교하여 보여준다. Aspen Natural Soil의 경우는 실제 토석류 퇴적형상보다는 위쪽으로 퇴적이 좀 더 많이 되는 것으로 나타났고, 146.28~146.01 km까지는 오히려 퇴적이 낮게 되며 주퇴적부에서는 거의 유사하게 나타남을 볼 수 있다. Aspenwatershed와 Glenwood 1의 경우는 실제 형상에 비해 매우 퇴적이 적게 발생하는 것을 볼 수 있다. 실제 고속도로에서는 고속도로 좌측에도 가드레일이 있어 토석이 고속도로를 완전히 벗어나지 못하고 0.1 m이하의 퇴적 일정구간에 걸쳐 퇴적된 것을 볼 수

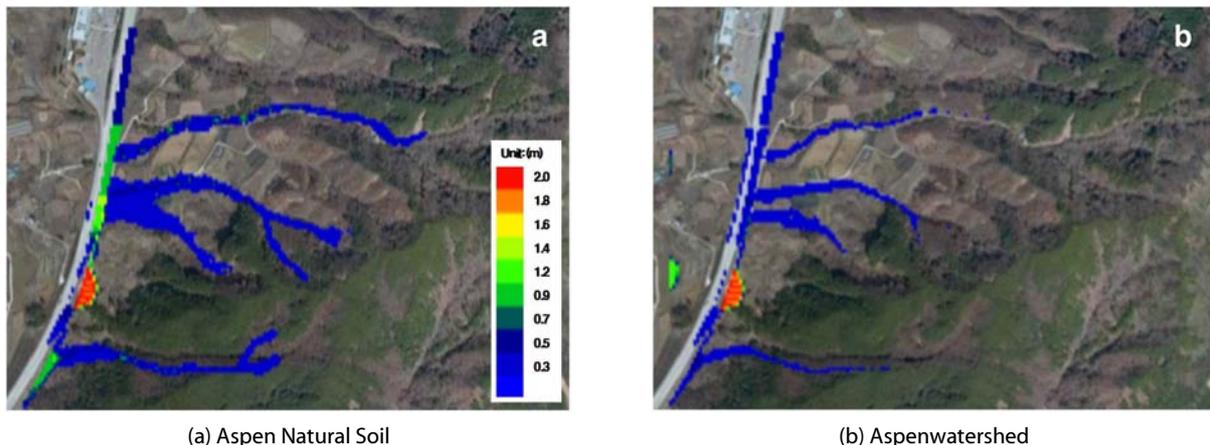


Fig. 5. Behavior of Debris Flow Under Topographical and Geological Conditions

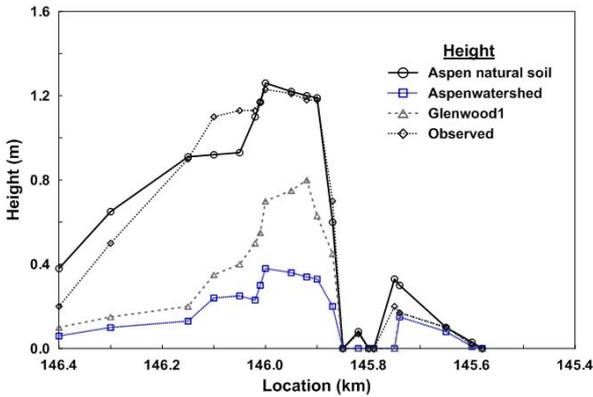


Fig. 6. Comparison of Observed and Computed Deposition Height Under Topographical and Geological Conditions

있는 것에 비해(Fig. 2) Fig. 5(a)에서 중앙분리대를 월류한 토석의 양이 거의 보이지 않는 것은 실제로는 월류한 양이 매우 적다기 보다는 월류 후 분산되어서 최종 퇴적량으로는 표시되지 않았다고 볼 수 있다.

4.1.2 층류저항계수(K)

층류저항계수(K)는 지표면 상태에 따라 Table 2를 활용할 수 있지만, 연구구역의 계곡부와 Table 2에서 보여준 지표면 상태가 부합하는 조건은 없어 다음과 같이 가장 유사한 2가지 지표면 상태를 Table 2에서 선정하였다.

- ① : 나지의 점토 - 농경지, 침식이 발생하는 곳 : 100 ~ 500
- ② : 식생이 드문 곳 : 1,000 ~ 4,000

KECRI(2007b)이 연구구역에 대해 수행한 토성시험 결과로는 점토성분이 많이 포함되어 있고 계곡부에 침식이 많이 발생한 점에서는 ①에 가까우나 ①의 경우는 계곡부에 해당되는 경우가 아니며 ②의 경우에도 연구구역과는 일부 지역만 일치하여 본 연구에서는 K 값을 ①과 ②의 사이값인 $K=500-2000$ 으로 추정하여 토석류 해석을 수행하였다.

Figs. 7(a) and 7(b)는 각각 $K=500$ 과 2000인 경우를 적용하여 토석류 거동 해석결과를 보여준다. Fig. 7에서 보여주듯이, K 값이 작은 경우는 고속도로에서의 퇴적이 비교적 적게 일어나고 대신 중앙분리대를 월류하여 반대편 농경지로 흐름이 진행된 것을 볼 수 있으며(Fig. 7(a)), 반대로 K 값이 큰 경우에는 거의 중앙분리대를 월류하지 못하고 고속도로상에 퇴적되어 중앙분리대보다 퇴적된 토석의 높이가 오히려 높은 역전현상을 보이기도 한다(Fig. 7(b)).

Fig. 8은 K 값에 따라 계산된 퇴적높이와 실제 실측 퇴적높이의 비교를 보여주며, K 값의 변화가 퇴적 높이에 미치는 영향을 보다



(a) $K=500$



(b) $K=2000$

Fig. 7. Behavior of Debris Flow Under Resistance Parameter

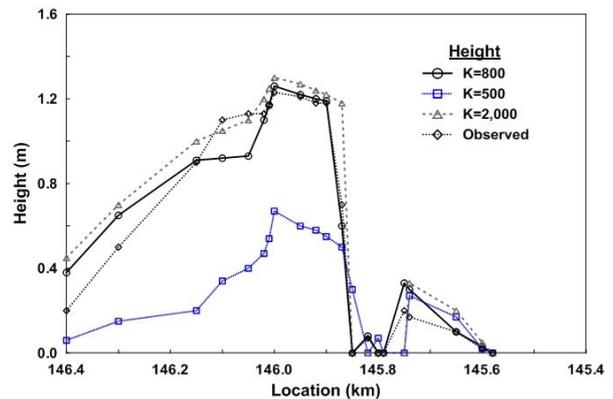


Fig. 8. Comparison of Observed and Computed Deposition Height Under Resistance Parameter

분명하게 보여주고 있다. K 값이 작을수록 최종 퇴적되는 양이 급격히 줄어들며, 반대로 커질수록 퇴적되는 양이 늘어남을 알 수 있다. 이런 현상은 K 값이 토석의 흐름에 미끄럼 마찰 정도를 결정하여 흐름의 속도 및 유동성에 영향을 미친 결과로 보여지며,

이는 토석류의 거동에 큰 영향을 미치므로 토석류 발생 위험지구 선정 및 저감시설 설계시 토성 및 지형 분석을 통한 K 값의 추정이 필요하다고 판단된다. 본 연구에서는 $K=500-2000$ 사이의 값을 반복적으로 적용하여 가장 실측치와 일치하는 $K=800$ 을 최적값으로 선정하였다.

4.2 매개변수 조합 분석

앞서 분석하여 결정한 매개변수인 지형 및 토질조건(τ_y, η)과 층류저항계수(K)값의 적합성을 확인하기 위해서, 앞서 매개변수의 민감도 분석에 사용한 지형 및 토질조건(τ_y, η)과 층류저항계수(K)값을 조합한 결과와 실측자료와의 비교를 수행하여 최적 매개변수 값 적용의 타당성을 검토하였다. Figs. 9(a) and 9(b)는 여러 조합 중에서 각각 지형 및 토질조건의 Aspenwatershed와 Glenwood 1에 $K=2000$ 을 적용하여 해석된 결과를 보여준다. Fig. 9(a)를 Fig. 2 및 Fig. 5(b)와 비교하면, 고속도로에 퇴적된 토석류의

높이가 조금 높아지기는 하였으나, 중앙분리대를 월류한 토석의 양이 여전히 지나치게 많은 것을 알 수 있다. Fig. 9(b)의 Glenwood 1의 경우에도 Aspenwatershed의 경우와 유사한 결과를 보여주었다. 본 연구구역에서는 두 매개변수의 여러 조합 중에서 Aspenwatershed와 $K=800$ 의 조합으로 계산된 값이 실측치와 가장 일치하는 결과는 보여주어, 이 매개변수의 조합이 최적의 현장 환경을 반영하고 있다고 판단하였다.

4.3 토석류 거동해석 결과 분석

매개변수의 민감도 분석을 통해 선정된 지형 및 토질조건인 Aspen Natural Soil, 층류저항계수 $K=800$ 을 적용하여 FLO-2D를 이용한 토석류 거동해석 결과는 Fig. 10에서 보여준다. Figs. 10(a) and 10(b) 각각 최종 퇴적형상, 토석류의 최대 속도벡터를 보여준다. Fig. 10(a)를 실제 조사된 퇴적현황(Fig. 2)과 비교해보면, 남측의 도로구역 밖으로 유출되어 정확한 퇴적형상을 알

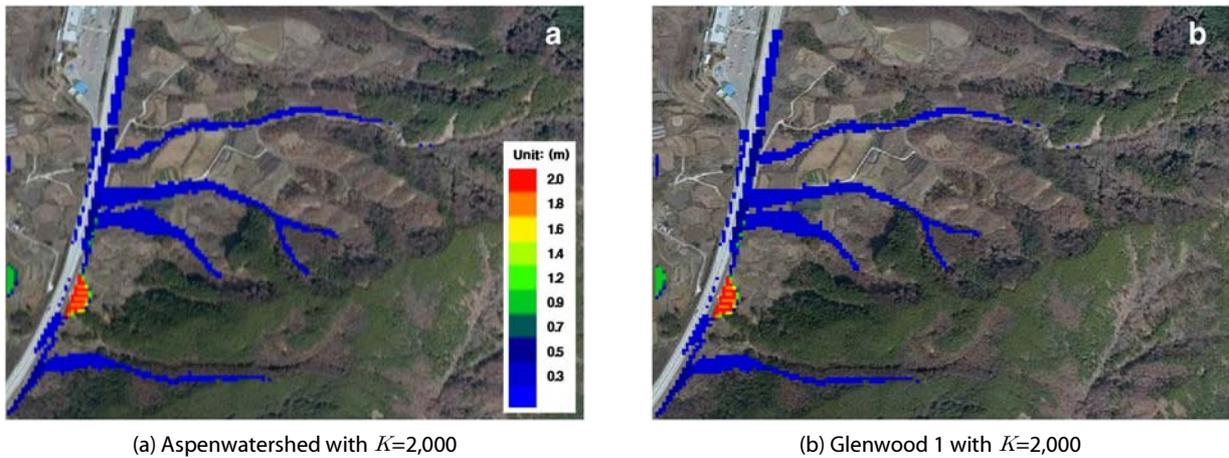


Fig. 9. Behavior of Debris Flow Under Parameter Combination

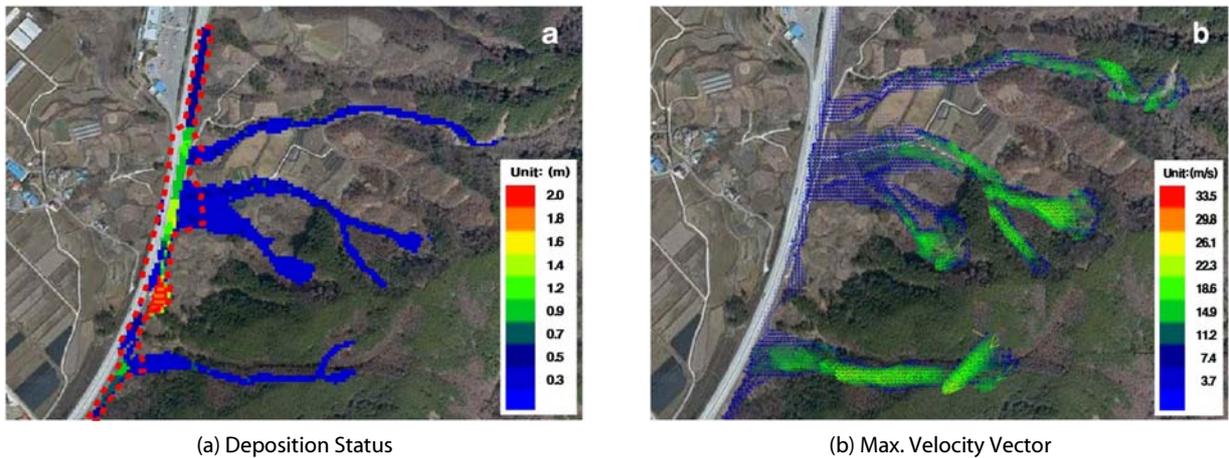


Fig. 10. Behavior of Debris Flow Under Calibrated Parameter

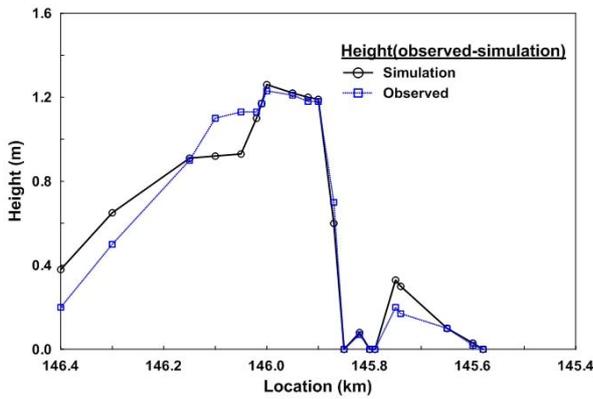


Fig. 11. Comparison of Observation and Computed Deposition Height With Calibrated Parameter

수 없는 부분을 제외하면 일치율은 80 %이다. 또한, 도로위의 토석류의 물량을 비교하여 보면 기록상 자료는 5,000 m³이고 모의 결과는 5,596 m³로 111 %의 일치율을 보여주었다. 기록상 자료가 덤프 상차를 기준으로 추정된 것임을 감안할 때 11 % 물량 오차는 매우 근접한 자료로 판단된다. Fig. 10(b)에서는 토석류의 흐름속도가 계곡부 이동시에는 5~20 m/s, 고속도로상에서는 1~4 m/s의 속도를 보여주고 있다.

Fig. 11은 고속도로위에 토석의 퇴적 높이를 위치별로 실측치와 계산치를 비교하여 나타낸 것으로, 46.4 km에서는 실측치가 좀 더 많이 퇴적(0.2 m) 되었고, 146.15~146 km까지는 오히려 계산치가 좀 더 많이 퇴적되었지만, 전반적인 퇴적형상은 두 값 모두 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. FLO-2D가 침식을 고려하지 못하는 것과 같은 수치해석 모형의 제한으로 토석류와 같이 순식간에 발생하는 자연현상을 완벽하게 재현하기에는 어느정도 한계가 있을 수 있지만, 본 연구에서 보여준 퇴적형상 및 퇴적높이, 퇴적량 등의 일치율을 고려하면, 고속도로에서 토석류 거동해석을 위한 FLO-2D 활용은 충분히 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 실제 고속도로 인접지역에서 발생한 토석류를 대상으로 고속도로에서의 토석류 거동을 FLO-2D 모형을 적용하여 재현함으로써, 고속도로에서의 토석류 영향 해석에 대해 FLO-2D 모형의 활용성을 검증하고자 하였다. 본 연구에 대한 결과는 다음과 같다.

- (1) 대전-진주간 고속도로의 덕유산 휴게소 구간에서 2005년 8월 발생한 토석류 사례를 대상으로 하여 GIS를 이용한 지형분석 및 HEC-HMS 모형을 이용한 수문분석 실시하였다. 또한,

FLO-2D 모형을 이용하여 토석류 거동 해석을 수행하였으며, 실측자료와의 비교·분석을 통하여 매개변수에 대한 민감도 분석을 실시하여 국내 고속도로 인접 지형에 적합한 최적의 매개변수 값을 제시하였다.

- (2) 연구구역에 대한 분석결과 국내 고속도로 인접 산악지형에 대한 최적 매개변수 값은 지형 및 토질 조건에 따른 항복응력 (τ_y)과 점성계수(η)는 Aspen Natural Soil에 해당되며, 층류저항계수(K)는 800이 최적임을 매개변수의 민감도 분석을 통해 제시하였다.
- (3) 모의 결과와 실측된 토석류 자료와의 비교를 실시한 결과, 퇴적 토사량은 실측자료가 5,000 m³, 계산결과는 5,596 m³로 나타나 퇴적형상 일치율은 80 %, 토석류 유출량 일치율은 111 %로 각각 양호하게 나타났으며, 본 연구에서 보여준 퇴적형상 및 퇴적높이, 퇴적량 등의 일치율을 고려하면, 고속도로에서 토석류 거동해석을 위한 FLO-2D 활용은 충분히 가능할 것으로 판단되었다.

References

Choi, D. Y. and Paik, J. C. (2012). "Characteristics of runout distance of debris flows in Korea." *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, Vol. 32, No. 3B, pp. 193-201 (in Korean).

Heim, A. (1932). *Landslides and human lives (Bergsturz und Menschenleben)*. Translated by Skermer, N. (1989). BiTech Publishers, Vancouver, Canada.

Kim, S. E., Paik, J. C. and Kim, K. S. (2013). "Run-out modeling of debris flows in mt. umyeon using FLO-2D." *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, Vol. 33, No. 3, pp. 965-974 (in Korean).

Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI) (2005). *Review of flood recovery plan on August 3, 2005*, Technical Advisory Report : GE-2005-S-00 (In Korean).

Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI) (2007a). *A Study on the Countermeasures for Reducing the Damage of Debris-flow on the Expressway* (In Korean).

Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI) (2007b). *A Detailed Survey of Debris-flow Occurrence Areas on the Expressways* (In Korean).

Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI) (2008). *Guideline for design against debris flow on expressway* (In Korean).

Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI) (2010). *Guidelines for Risk Assessment and Grading in Vulnerable Section for Debris-flow* (In Korean).

Lee, J. H., Ryu, S. H., Koo, H. B., Kim, S. W. and Kim, S. H. (2012). "Case study on the hazard susceptibility prediction of debris flows using surface water concentration analysis and the distinct element method." *The journal of Engineering Geology*, Vol. 22, No. 3, pp. 283-291 (in Korean).

- Lee, J. S., Song, C. G., Kim, H. T. and Lee, S. O. (2015). "Risk analysis considering the topography characteristics of debris flow occurrence area." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 3, pp. 75-82 (in Korean).
- 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.
- Meyer, N. K., Schwanghart, W., Korup, O. and Nadim, F. (2015). "Roads at risk: traffic detours from debris flows in southern norway." *Natural Hazards and Earth System sciences*, Vol. 15, No. 5, pp. 985-995.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2007). *Mountain road design manual* (In Korean).
- O'Brien, J. S. (2018). *FLO-2D Reference manual*, version 2018, FLO-2D Software Inc., Nutrioso, AZ 85932.
- O'Brien, J. S. (1986). *Physical processes, rheology and modeling of mudflow*, thesis presented to the Civil Engineering Department, Colorado State University, at Fort Collins, Colo., in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
- O'Brien, J. S. and Julien, P. Y. (1985). "Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows." *Proc., ASCE Specialty Conf. on Delineations of Landslide, Flashflood, and Debris Flow Hazards in Utah*, D. S. Bowles, ed., Logan, Utah, pp. 260-279.
- O'Brien, J. S., Julien, P. Y. and Fullerton, W. T. (1993). "Two-Dimensional Water Flood and Mudflow Simulation." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 244-261.
- Woolhiser, D. A. (1975). *Simulation of Unsteady Overland Flow, in Unsteady Flow in Open Channels*, Mahmood, K. and Yevjevich, V. eds., Water Resources Publications, Fort Collins, CO.