

광역 토사재해 물리적 취약성 평가를 위한 Flow-R 모델의 매개변수 분석

Parameter Analysis of Flow-R Model for Physical Vulnerability Assessment of Debris Flow Disaster in Regional Scale

강효섭* · 김윤태**

Kang, Hyo-Sub*, and Kim, Yun-Tae**

Abstract

This study analyzed effects of input parameters (maximum velocity and travel angle) of Flow-R model on debris flow mobility and deposition, which are essential to evaluate physical vulnerability of debris flow disasters in regional scale. The characteristics of debris flow spreading area and the maximum kinetic energy were analyzed through sensitivity analysis according to input parameters. Back analysis was carried out using total 11 cases of debris flow disasters in 2011, and the reasonable values of input parameters were determined through a comparison with investigated debris flow spreading areas. The results of numerical analysis showed that debris flow spreading area and kinetic energy increased with an increase in maximum velocity, but they converged to asymptote values at critical maximum velocity. The debris flow spreading area decreases with an increase in travel angle. Several case studies showed that travel angles of the 11 debris flow disaster regions were ranged from 10° to 22°, with an average of 15°, and the maximum velocities from 11 m/s to 35 m/s, with an average value of 22 m/s. The estimated travel angle and maximum velocity were compared with the results of previous researches.

Key words : Flow-R Model, Debris Flow Disaster, Physical Vulnerability Assessment, Travel Angle, Maximum Velocity

요 지

본 연구는 광역 토사재해 물리적 취약성 평가를 위해 필요한 Flow-R 입력 매개변수(토석류 최대속도, 이동각)가 토석류의 거동특성에 미치는 영향에 대한 분석을 수행하였다. 입력 매개변수에 따른 민감도 분석을 통해 토석류 확산면적과 최대 운동에너지 변화 특성을 분석하였다. 2011년에 발생한 총 11개 토석류 재해 사례에 대해 Flow-R 모델을 이용하여 역해석을 수행하였고, 조사된 토석류 재해영역과의 비교를 통해 합리적인 입력 매개변수를 산정하였다. 최대속도가 증가함에 따라 토석류 확산범위가 증가하는 것으로 나타났으며, 한계 최대속도 이상에서는 토석류 확산범위가 수렴하는 것으로 나타났다. 이동각이 증가함에 따라 토석류 확산면적은 감소하는 것으로 나타났다. 사례 분석을 통해 산정된 총 11개 토석류 재해지역의 이동각은 10°~22°범위를 나타내며, 평균값은 약 15°로 분석되었다. 역해석을 통해 얻어진 한계 최대속도 값은 11 m/s에서 35 m/s범위를 나타내며, 평균 값은 약 22 m/s로 분석되었다. 산정된 이동각과 최대속도를 기존 연구결과와 비교하였다.

핵심용어 : Flow-R 모델, 토사재해, 물리적 취약성 평가, 이동각, 최대속도

1. 서 론

기후 변화로 인한 극한강우 뿐만 아니라 도시화, 산업화로

인한 산지 개발로 인하여 토사재해에 대한 잠재적인 위험성은 지속적으로 증가하는 추세이다(Kang and Kim, 2015). 2011년 막대한 인명과 재산피해를 초래한 서울 우면산, 춘천

*정회원, 국립재난안전연구원 책임연구원(E-mail: hskang2233@korea.kr)

Member, Researcher, National Disaster Management Institute

**교신저자, 정회원, 부경대학교 해양공학과 교수(Tel: +82-51-629-6587, Fax: +82-51-629-6580, E-mail: yuntkim@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University

마적산 토석류 재해로 인해 산지 중심의 연구에서 산지 하부의 도심지를 포함하는 취약성과 재난안전 대책에 대한 연구가 증대되고 있다. 산사태 발생 예측을 위한 강우규준, 산사태 민감도 특성 및 사면 파괴 메카니즘, 토석류 흐름 특성 및 산사태 토석류 전이규준 모델 등(Yoon et al., 2015; Kang et al., 2015; Kang and Kim, 2016b, 2016c; Cho, 2015; Pradhan et al., 2016; Chae et al., 2016)과 같은 토사재해 관련 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 이와 더불어 최근 산지나 급경사지 하부에 위치한 주거지역에 예상되는 인명과 재산피해에 대한 토사재해 취약성 평가에 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다. 예를 들면, 토사재해 물리적 취약함수 연구, 기후변화에 따른 재해취약성 방법론, 토사재해 사회경제적 취약성 평가 및 사면의 위험도 평가 등이 있다(Kang and Kim, 2014, 2015, 2016a; Park et al., 2015; Choi et al., 2014; Ryu and Han, 2016; Lee et al., 2016).

Kang et al. (2016)은 광역기반의 토사재해 물리적 취약성 평가 방법을 제안하였다. 산림청에서 제공하는 산사태 위험 지도를 이용하여 잠재발생지역을 판별하고, 토석류 거동 해석을 통해 확산범위 및 충격압 계산하고, 물리적 취약함수를 적용하여 취약성 평가를 한다. 이와 같이 토사재해 취약성 혹은 리스크를 평가하기 위해서는 토석류 거동 해석이 필수적으로 수반되어야 한다(Quan Luna et al., 2014; Lari et al., 2011; Hussin et al., 2014).

토석류 유동 해석을 위한 여러 모델이 존재(O'Brien et al., 1993; Hungr, 1995; Crosta et al., 2003; Iovine et al., 2005)하지만 극히 일부 모델만이 광역에 이용될 수 있다(van Westen et al., 2006; Berti and Simoni, 2007). 복잡한 자연현상 (Hungr, 1995; Iverson, 1997), 흐르는 동안 계속적으로 변하는 유동체의 유변물성 변화, 입력 매개변수의 불확실성(He et al., 2003) 등으로 인해 토석류의 물리적 특성을 반영한 정확한 해석은 어렵다. 경험적 모델은 과거 발생된 토석류 재해사례에 대한 역해석을 통해 최적 매개변수를 산정하고 광역에 적용할 수 있다(Kappes et al., 2011). 이와 같은 방법은 각 단위 구역의 현장 고유 특성을 개별적으로 반영할 수 없는 단점이 있으나, 광역의 토석류 거동을 유사한 환경 하에서 합리적으로 모의할 수 있는 장점을 가진다(Horton et al., 2013).

Flow-R 모델은 광역 토석류 유동 평가를 위해 개발되었다(Meelli and Taramelli, 2004; Guinau et al., 2007). GIS기반 경험적 모델이며 토석류 잠재발생원과 유동 흐름 범위를 산정할 수 있다. 여러 국가에서 다양한 사례 연구에 적용되고 있다. 국내에서도 Kang and Kim(2015), Park et al.(2016a), Park et al.(2013, 2016b)에 의해 Flow-R 모델을 이용하여 광역 토석류 해석을 수행한 바 있으며, 이를 통해 물리적·사회경제적 취약성 평가 연구가 수행되었다. Flow-R 모델은 짧은 시간에 광역에 대한 토석류 해석이 가능하며 단순화된 입력변수를 갖는 것이 장점이나, 입력 매개변수 분석에 대한 연구는 미흡한 실정이다. Flow-R 모델을 이용한 국내

연구사례를 살펴보면 입력 매개변수를 국외 연구사례를 통해 제시된 값을 이용하거나, 특정지역의 토석류 자료를 이용하고 있는 실정이다. 입력 매개변수 변화에 따라 토사재해 확산범위는 달라지므로 국내 환경에 맞는 입력 매개변수 분석에 대한 연구가 필요하다. 광역 토석류 해석을 위해 각 단위 구역별로 입력변수를 달리 적용하여 해석하기에는 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 입력변수 적용 값 또한 불확실성이 존재한다. 따라서 국내 토사재해 사례를 기반으로 한 합리적인 입력변수 산정이 필요하다.

본 연구에서는 광역 토사재해 취약성 평가를 위해 사용되는 Flow-R 모델의 입력 매개변수(최대속도, 이동각)에 대한 토석류 거동특성 연구를 수행하였다. 매개변수에 따른 민감도 분석을 통해 토석류 확산면적과 운동에너지 변화 특성을 분석하였다. 국내에서 발생된 총 11개 토석류 재해지역을 대상으로 Flow-R 모델을 이용하여 입력 매개변수에 따른 역해석을 수행하였다. 역해석 결과와 토사재해 사례 분석을 통해 조사된 토석류 확산범위를 바탕으로 최적 이동각(travel angle)과 최대속도를 산정하였다. 산정된 이동각과 최대속도를 기존 국내·외 연구결과와 비교·분석하였다. 또한 산정된 입력 매개변수와 토석류 재해지역의 물리·지형적 특성과의 상관성에 대한 분석을 수행하였다.

2. 이론적 배경 및 연구방법

2.1 토사재해 물리적 취약성 평가

물리적 취약성은 위험 영역 내에 존재하는 구조물, 건물과 같은 위험요소의 손실 또는 손상정도를 의미하며, 0에서 1 사이의 정량화된 값으로 표현된다. 토석류가 구조물에 미치는 영향에 대한 정량적 평가가 수반되어야 하며 대부분 토석류 유동 해석을 통해 평가된다. Fig. 1은 Kang et al. (2016)에 의해 제안된 토사재해 물리적 취약성 평가 과정을 나타낸다. Flow-R 모델을 이용하여 토사재해 확산범위 및 운동에너지를 산정하였고 GIS기반 집계구별 토사재해에 의한 물리적 취약성 평가가 가능하다. Fig. 1은 부산광역시에 적용된 토사재해 취약성 평가 사례를 나타낸다. 집계구(census output area, COA)는 통계정보를 공표하기 위한 최소단위로, 하나의 집계구 크기는 평균 읍·면·동 크기의 1/23 수준이다(Park et al., 2016a).

물리적 취약성 평가는 크게 7단계로 구분되며, (a) 산사태 위험지도를 이용한 잠재발생원 산정, (b) Flow-R을 이용한 광역 토석류 해석, (c) 토사재해 영향 집계구 추출, (d) 토사재해 영향 집계구별 건물 형식 분류, (e) 영향 집계구별 충격압 계산, (f) 계산된 충격압을 취약함수에 적용하여 집계구별 토사재해 취약지수 산정, (g) 토사재해 물리적 취약지도 작성 순으로 나뉜다. 이때 물리적 취약성 평가결과에 큰 영향을 미치는 요소는 토사재해 잠재발생원 산정과 광역 토석류 해석 부분을 들 수 있다. 토사재해 잠재발생원은

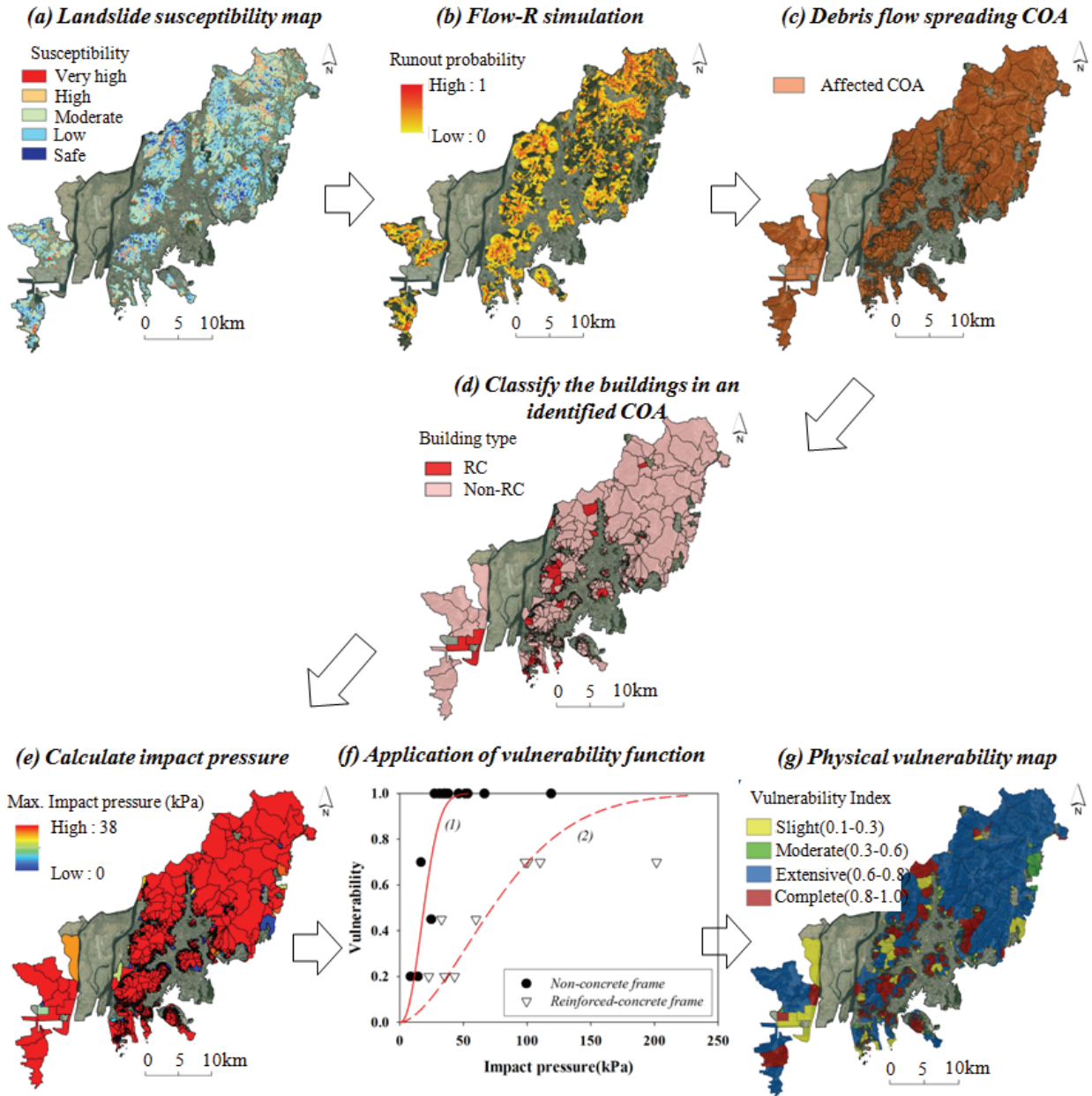


Fig. 1. Procedure of Physical Vulnerability Assessment (Kang et al., 2016)

산림청에서 제공하는 산사태 위험지도에서 위험등급 1등급에 해당하는 지역으로 선정하였다. 실질적인 토사재해 취약성 평가를 위해서는 토석류 유동해석을 통해 토석류 재해 위험지역을 판별하는 기술이 필요하다. Flow-R 모델은 짧은 시간에 광역에 대한 토석류 해석이 가능하며, 단순화된 입력 매개변수를 갖는 것이 장점이다. 그러나 Flow-R 모델의 입력 매개변수 변화에 따라 토사재해 확산범위는 크게 달라진다. 아직까지 국내 실정에 맞는 입력 매개변수 값이 제시되어 있지 않은 실정이다. 따라서 국내 지형조건에 맞는 입력 매개변수를 산정하기 위해서는 국내 토사재해 사례를 기반으로 한 합리적인 입력 매개변수산정이 필요하다.

2.2 Flow-R 모델

토석류 취약성 평가를 위한 광역 토석류 해석 시 복잡한 자연현상, 유동체의 유변물성의 변화, 모델링 매개변수의 불확실성 등으로 인해 다양한 물리적 특성이 반영된 정확한 해석이 어렵다. 따라서 광역 토석류 해석을 위해서는 매개변수에 크게 의존하지 않으면서 최소한의 데이터 요구 사항으로 단순화된 접근법을 고려해야 한다. Flow-R은 광역 토석류 유동 평가를 위한 모델이다. Flow-R은 Matlab 상에서 DEM 기반의 공간적으로 분포된 경험적 모델이다(Horton et al., 2013). 본 모델은 초기 발생영역을 이용하여 확산 영역을 계산하며 확산 알고리즘은 사용자가 선택할 수 있다. 토석류

이동거리를 모델링할 때 불확실성의 주요 원천인 발생영역의 부피는 고려하지 않는다. 이동거리 계산은 단위 에너지 균형, 일정 손실합수와 임계 속도 값을 기반으로 한다(Horton et al., 2013). 본 연구에서는 토석류 흐름에 적합한 Holmgren 알고리즘을 선택하였다(van Westen et al., 2014). 이동거리 평가는 단순 마찰법(simple frictional law)을 기반으로 한다. 전체 에너지는 운동에너지, 위치에너지와 마찰에 의한 손실 에너지로 구성된다. Fig. 2와 같이 임의의 수평거리 x 지점에서의 전체 에너지는 Eq. (1)과 같다. $\Delta h_{el}(x)$ 을 Eq. (2)와 같이 정리하면, 수평 이동거리 x 지점에서의 속도는 Eq. (3)과 같이 정의된다.

$$(H-h(x))mg = \frac{1}{2}mv_x^2 + mgx\tan(\beta) \quad (1)$$

$$\Delta h_{el}(x) = H-h(x) - x\tan(\beta) \quad (2)$$

$$v(x) = \sqrt{2g\Delta h_{el}(x)} \quad (3)$$

여기서 H 는 발생지점 사면의 전체 고도, g 는 중력가속도, m 은 토체의 질량, β 는 마찰각(또는 이동각), x 는 수평 이동 거리, $v(x)$ 와 $h(x)$ 는 x 지점에서의 속도와 고도를 나타낸다.

단순 마찰법은 발생 영역의 양을 고려하지 않기 때문에 에너지 균형은 단일하다. 이러한 방법은 정확한 물리적 프로세스를 나타내는 것이 아니라 실질적인 결과를 얻는 것을 목표로 한다(Park et al., 2016b). Eq. (1)의 단순 마찰법에 의한 에너지 정의를 기반으로 운동에너지 E_{kin}^i 는 Eq. (4)와 같이 정의된다.

$$E_{kin}^i = E_{kin}^0 + \Delta E_{pot}^i - E_f^i \quad (4)$$

여기서 E_{kin}^i 는 셀의 방향 i 에서의 운동에너지, E_{kin}^0 는 셀 중심에서의 운동에너지, ΔE_{pot}^i 는 셀의 방향 i 에서의 포텐셜 에너지 변화, E_f^i 는 셀의 방향 i 에서의 마찰에 의해 손실된 에너지이다.

마찰손실 E_f^i 은 Simplified friction-limited model(SFLM)을 적용하였다. SFLM은 이동각(travel angle)을 이용하여 최대 이동거리를 계산한다. 이동각은 토석류 흐름이 도달한 가장 먼 지점까지의 경로와 발생 영역을 연결한 선의 각도이다. 본 모델은 Fig. 2와 같이 이동각(β)을 이용하여 최대 이동거리를 계산하며, 일정 마찰손실을 고려하여 시작점과 종점 사이의 평균 경사각으로 정의된다. Eq. (1)의 $mgx\tan(\beta)$ 항에 해당되는 마찰 손실에너지 E_f^i 는 Eq. (5)와 같이 정의된다.

$$E_f^i = g\Delta x\tan(\beta) \quad (5)$$

여기서, E_f^i 는 방향 i 에서 중심 셀에서 셀까지의 손실된

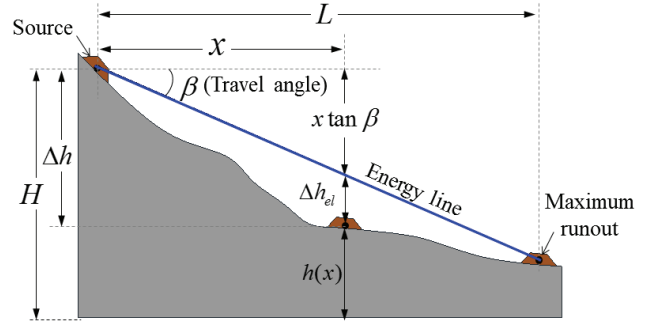


Fig. 2. Definition of Energy Line (modified Jaboyedoff et al., 2011)

마찰 에너지, Δx 는 수평변위 증분, $\tan\beta$ 은 에너지 라인의 기울기이다. 낮은 각은 확산영역이 더 넓어짐을 의미한다. 그러나 이러한 접근법은 가파른 계곡부나 급격하게 고도가 변화하는 구간에서 비현실적인 에너지 양에 도달하여 합리적이지 못한 에너지를 유발할 수 있다. 합리적인 에너지 값을 유지하기 위해 현실적인 속도를 초과하지 않도록 Eq. (6)과 같이 최대속도를 제한하였다(Horton et al., 2013).

$$V_i = \min\left\{\sqrt{V_0^2 + 2g\Delta h - 2g\Delta x\tan(\beta)}, V_{\max}\right\} \quad (6)$$

여기서 Δh 는 방향 i 에서 중심 셀에서 셀까지의 고도차, V_{\max} 는 최대속도, V_0 는 초기속도를 나타낸다. 토석류 최대 속도는 지리적 환경조건에 따라 달라질 수 있다.

3. 연구대상 지역

2011년 7월-8월에 극한강우로 인해 전국적으로 토사재해가 다수 발생했다. 특히 서울, 경기도 지역 등의 도심지 주변에서 다수 발생하여 많은 인명과 재산 손실을 입혔다. 6, 7, 8월에 토석류 재해지역에 내린 평균 누적강우량은 1,390 mm으로서 연강우량의 76%에 해당하는 것으로 분석되었다. 대부분의 연구지역은 7월에 가장 많은 강우량을 기록하였으며, 연강우량의 43%가 7월에 집중되는 것으로 나타났다. 이와 같이 극한강우는 토사재해를 유발하는 중요한 인자임을 알 수 있다.

본 연구에서는 Flow-R 입력 매개변수를 산정하기 위해 국내 토석류 재해사례를 대상으로 역해석을 수행하였다. Fig. 3은 2011년에 인명과 재산피해가 크게 발생된 토석류 재해사례를 분석한 자료이다. 총 11개 토석류 재해지역을 대상으로 현장 조사보고서, 수치지도, 위성사진을 이용하여 토석류 발생 지역에 대한 분석을 수행하였다. 토석류 재해 발생지와 피해범위는 재해 발생 후 위성사진과 현장 조사보고서 자료를 토대로 산정하였다. Fig. 3은 본 연구지역인 밀양 상동면 신곡리(a), 용인시 처인구 모현면 능원리(b), 포천시 일동면 기산리(c), 포천시 신북면 심곡리(d), 동두천시 하봉암동(e), 과천시(f), 서울특별시 서초구 우면산(g), 동두

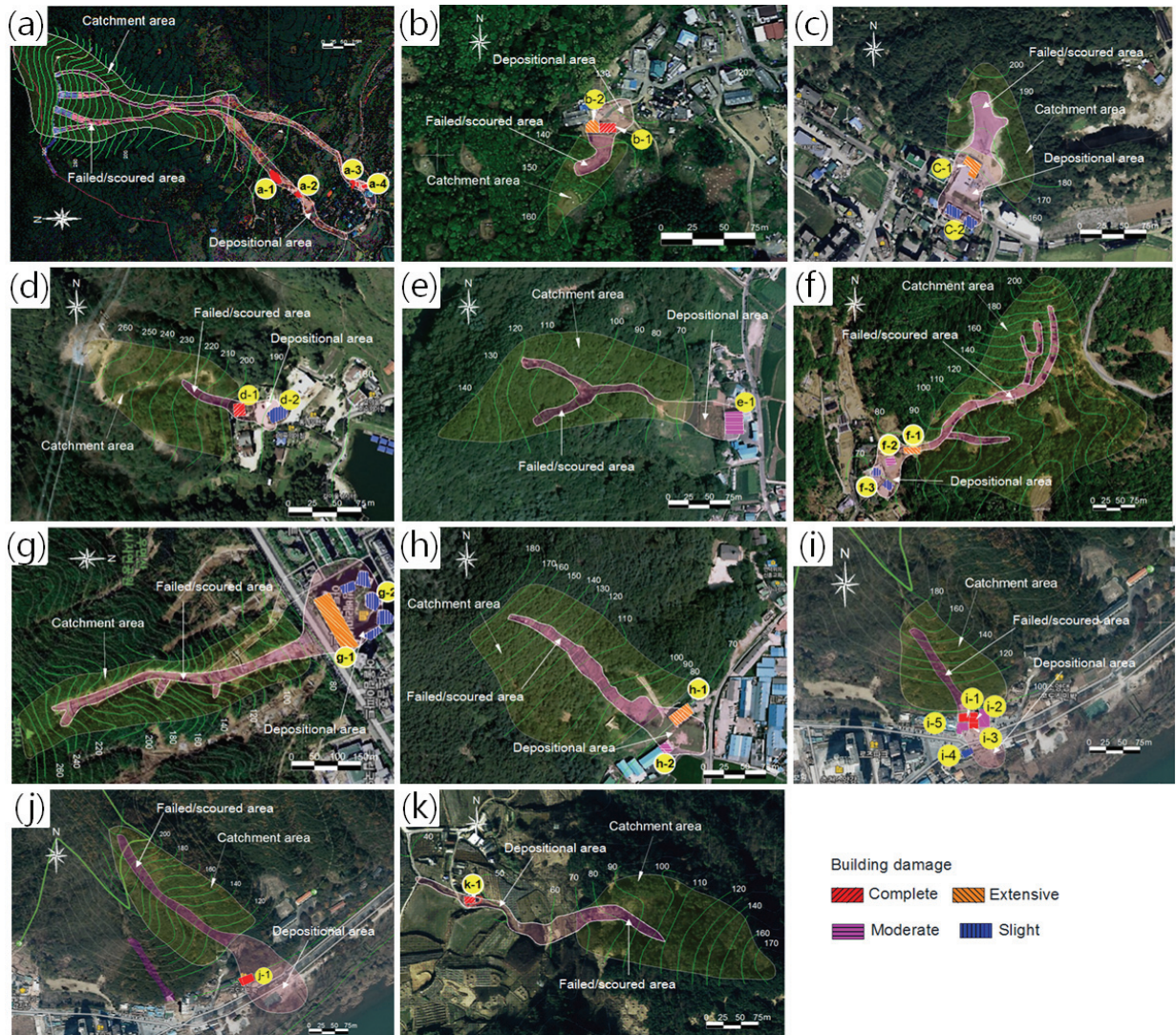


Fig. 3. Contour and Debris Flow Overlaid in Aerial Photos
 (a) Miryang, (b) Yongin, (c) Pocheon I, (d) Pocheon S, (e) Dongducheon H, (f) Gwacheon, (g) Seoul Seocho, (h) Dongducheon S, (i) Chuncheon I, (j) Chuncheon J and (k) Jeongeup (Kang and Kim, 2016a)

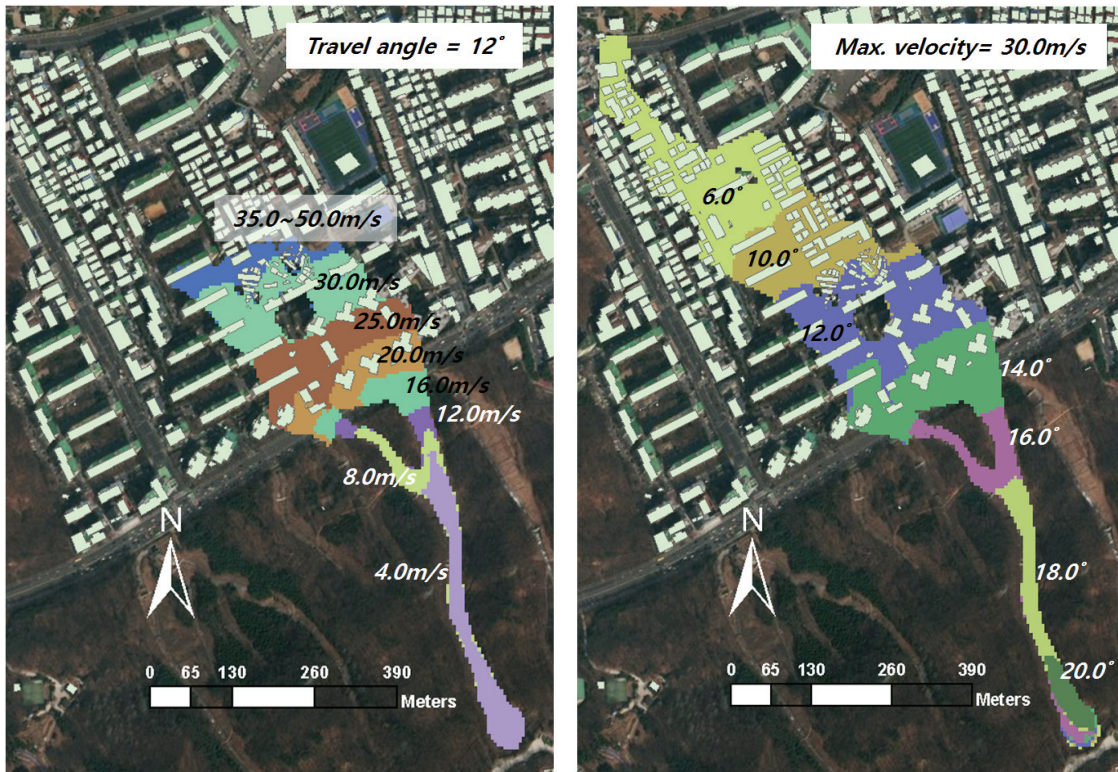
천시 상봉암동(h), 춘천시 신북면 천전리(i, j) 및 정읍시 입암면(k)의 토석류 재해지역에 대한 분석결과를 나타낸다. 8개의 토사재해 지역(b, d, e, f, g, h, I, J)은 변성암 풍화토 지역으로 분류되었고, 3개 지역(a, c, k)은 화강풍화토 지역으로 구분된다.

4. 해석결과 및 분석

4.1 매개변수에 따른 민감도 특성

Flow-R 모델의 매개변수 변화에 따른 토석류 확산범위와 운동에너지 분석을 위해 토석류 최대속도와 이동각(Travel angle)의 변화에 따른 민감도 특성을 파악하였다. Fig. 4는 우면산 래미안 아파트 토석류 재해지역을 대상으로 토석류 최대속도와 이동각 변화에 따른 Flow-R 해석결과를 나타낸다. Fig. 4(a)는 이동각이 12°로 고정된 상태에서 최대속도가

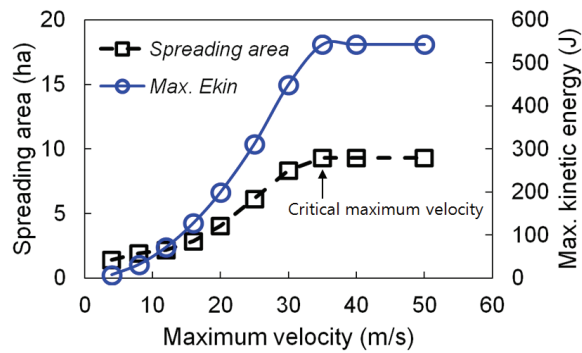
4 m/s에서 50 m/s범위 내에서 증가될 때 해석 결과를 나타낸다. 입력변수인 최대속도가 증가함에 따라 토석류 확산범위가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 토석류 최대속도가 35.0m/s 이상인 경우 확산범위의 증가가 없었다. 이와 같은 결과는 설정된 이동각 이상으로 토석류가 확산되지 않기 때문이다. Fig. 4(b)는 최대속도를 30 m/s로 고정한 상태에서 이동각을 6°에서 20°범위 내에서 단계별로 증가시켜 해석한 결과를 나타낸다. 이동각이 증가함에 따라 토석류 확산면적은 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 이동각이 감소함에 따라 토석류의 확산 영역은 확대됨을 의미한다. Figs. 4(a)와 (b)의 결과에서처럼 토석류 최대속도가 12 m/s 이하일 때와 이동각이 16° 이상일 때 해석된 결과를 보면 토석류가 도심지에 영향이 미치지 않는 것으로 나타났다. 이와 같이 입력 매개변수인 이동각과 최대속도는 토석류 해석결과에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.



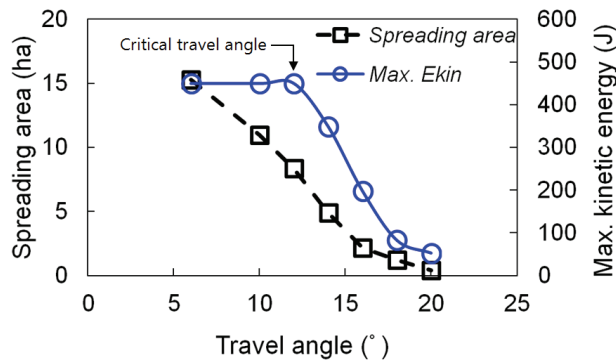
(a) Effect of maximum velocity

(b) Effect of travel angle

Fig. 4. Effect of the Input Parameters on a Debris Flow Fan in the Reamian Apartment Basin



(a) Variation of spreading area and maximum kinetic energy as a function of the maximum velocity



(b) Variation of spreading area and maximum kinetic energy as a function of the travel angle

Fig. 5. Variation of Spreading Area and Maximum Kinetic Energy as a Function of the Input Parameter in Flow-R Model

Fig. 5는 토석류 최대속도와 이동각 변화에 따른 확산면적과 최대 운동에너지의 변화를 분석한 그래프이다. 최대속도가 증가할수록 확산면적과 최대 운동에너지는 증가하나, 특정 최대속도 값 이상에서는 수렴하는 경향을 나타낸다. 확산범위가 수렴될 때의 최대속도를 한계 최대속도(critical maximum velocity)라고 정의하였다. 한계 최대속도 이상으로 최대속도가 증가하더라도 확산범위가 수렴하는 이유는 입력된 이동각 이상으로 토석류가 확산되지 않기 때문이다. 운동에너지가 수렴하는 이유는 입력 최대속도가 증가하더라도 한계 최대속도 이상에서는 Eq. (6)의 첫 번째 항($\sqrt{V_0^2 + 2g\Delta h - 2g\Delta x \tan(\beta)}$)에 의한 속도가 입력 최대속도(V_{max})보다 작고, 일정한 값을 갖기 때문이다. 이동각이 증가함에 따라 토석류 확산면적은 감소하는 것으로 나타났으나, 최대 운동에너지는 한계 이동각 이하에서는 일정한 값을 나타낸다. 이와 같은 결과는 한계 이동각 이하에서는 토석류 속도가 Eq. (6)의 둘째 항(V_{max})에 의존하므로 설정된 최대속도 이상으로 속도가 증가되지 않는다. Fig. 5(b)에 보듯이 이동각이 12° 이하에서는 Eq. (6)의 최대속도(V_{max})가 항상 최소가 되므로 최대 운동에너지가 일정 값에 수렴한다.

Flow-R 모델을 통해 구한 토석류 확산면적과 최대 운동에너지는 입력매개 변수인 토석류 최대속도와 이동각에 모두 영향을 받으나, 한계 최대속도 이상에서는 확산면적과 최대 운동에너지는 수렴하는 경향을 가짐을 알 수 있다.

4.2 매개변수 변화에 따른 토석류 재해지역 역해석

Flow-R 모델을 이용하여 토석류 해석시 필요한 최적 입력매개변수를 파악하기 위해 국내에서 발생된 총 11개 토석류 재해지역에서 조사된 토석류 확산범위를 대상으로 매개변수에 대한 역해석을 수행하였다. 4.1절의 매개변수 변화에 따른 민감도 분석에서 알 수 있듯이 토석류 확산범위는 토석류 최대속도와 이동각에 영향을 받는다. Fig. 2와 같이 토석류 발생원과 퇴적부 끝점을 연결한 선의 각도로 정의되

는 이동각은 재해이력 자료를 통해 산정할 수 있다. Fig. 6은 11개 토석류 재해지역 자료를 바탕으로 산정된 이동각을 나타낸다. 산정된 이동각은 10° 에서 22° 범위를 나타내며, 평균 값은 약 15° 로 분석되었다.

Flow-R 해석 시 각 재해지역에서 산정된 이동각을 적용하였으며, 최대속도 변화에 따른 역해석을 수행하였다. 이를 통해 Flow-R 모델의 최적 입력 매개변수를 산정하였다. Fig. 7은 연구대상 지역 11개소 중 대표적인 3개소(밀양 상동면 신곡리, 과천시 과천동, 서울시 서초구 우면산 재해지역)의 토석류 입력 최대속도 변화에 따른 역해석 결과를 나타낸다. Flow-R 역해석 시 적용된 이동각은 밀양 상동면의 경우 14° , 과천시 과천동과 서울 우면산의 경우 13° 를 적용하였다. 토석류 최대속도가 증가할수록 확산범위는 넓어지며, 한계 속도 이상에서는 확산범위의 변화가 없음을 알 수 있다. 이동각은 조사된 토석류 확산범위를 기반으로 하고 있기 때문에 해석결과의 최대 확산범위는 조사된 범위에 근접되어 있음을 알 수 있다.

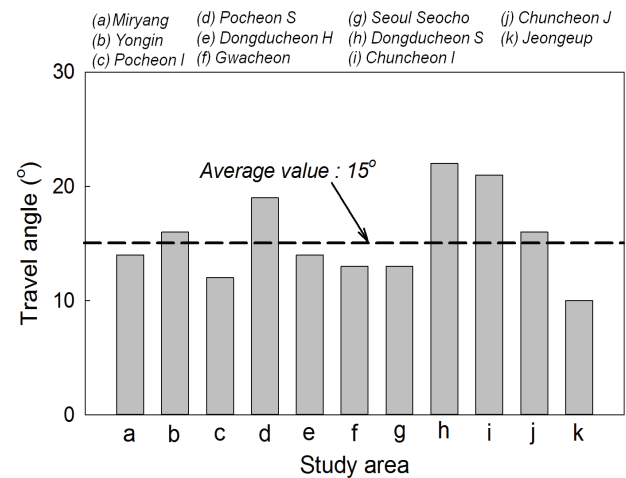


Fig. 6. Travel Angle of Each Study Areas

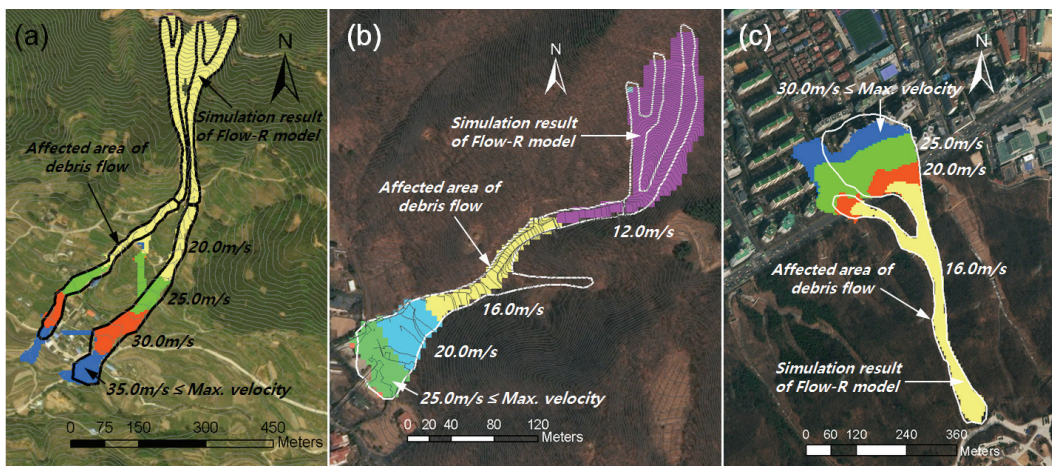


Fig. 7. Simulation Result of Flow-R Model with Varying Maximum Velocity (a) Miryang, (b) Gwacheon, and (c) Seoul Seocho

Fig. 8은 총 11개 토석류 재해 지역의 토석류 속도 변화에 따른 확산범위와 최대운동에너지를 나타낸다. 전체적으로 최대속도 값이 증가함에 따라 확산범위와 최대운동에너지는 증가하는 경향을 보이다가 한계 속도 값 이상에서 수렴하는 경향을 나타낸다. 확산범위와 최대운동에너지가 수렴하기 시작하는 시점에 대응되는 토석류 최대속도 값은 항상 일치하지 않으나, 유사한 범위 내에 있음을 알 수 있다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 토석류 최대속도 변화에 따른 Flow-R 해석결과 밀양(Fig. 8(a)), 과천(Fig. 8(f)), 우면산(Fig. 8(g))은 각각 35 m/s, 25 m/s 및 30 m/s에서 확산범위가 수렴됨을 알 수 있다. 최대속도가 한계 최대속도를 초과하면 확산범위는 수렴한다. Fig. 9는 11개 재해지역의 해석결과를 통해 얻어진 한계 최대속도 값을 나타낸다. 국내에서 발생한 토석류 피해범위를 산정하기 위하여 필요한 한계 최대속도 값은 11 m/s에서 35 m/s범위를 나타내며, 평균 값은 약 22 m/s로 분석되었다. 밀양 토석류(a)의 경우 토석류의 전체 이동거리가 길기 때문에 한계 최대속도가 크게 나타났고 용인 토석류

(b)의 경우 토석류 전체 이동거리가 짧기 때문에 한계 최대속도는 작게 산정되었다.

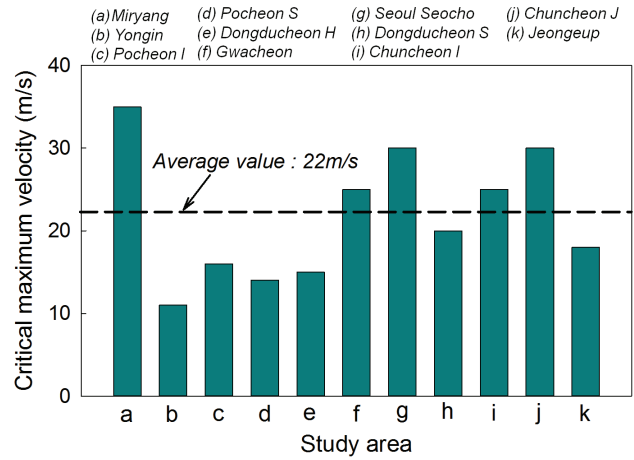


Fig. 9. Critical Maximum Velocity of Each Study Area

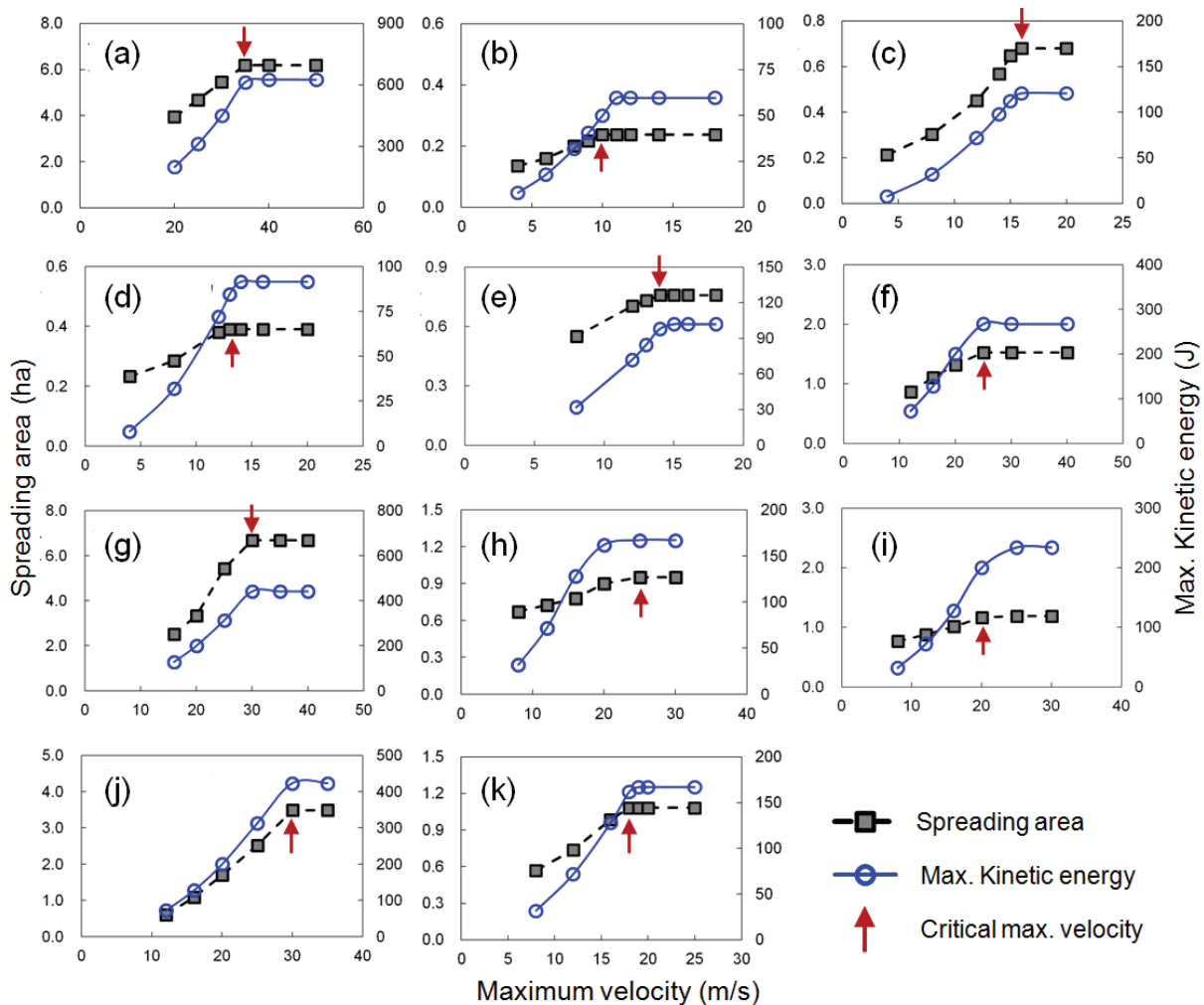


Fig. 8. Analysis Results of Spreading Area and Maximum Kinetic Energy with Different Maximum Velocities (a) Miryang, (b) Yongin, (c) Pocheon I, (d) Pocheon S, (e) Dongducheon H, (f) Gwacheon, (g) Seoul Seocho, (h) Dongducheon S, (i) Chuncheon I, (j) Chuncheon J, and (k) Jeongeup

4.3 매개변수 비교

재해사례 분석과 Flow-R 역해석을 통해 산정된 이동각과 최대속도를 기존 연구결과와 비교·분석하였다. Fig. 10(a)는 본 연구에서 산정된 이동각을 국내·외 연구결과와 비교하였다. 국외 여러 사례(Bathurst et al., 1997; Lari et al., 2011; Blahut et al., 2010a, 2010b)를 분석한 결과 이동각은 5°에서 15° 범위로 산정되고 있음을 알 수 있다. Jun et al.(2013)은 강원지역의 총 180개소 토석류 사례분석을 통해 이동각은 2°에서 55°의 범위를 갖는 것으로 조사되었다. 개소수가 많고, 다양한 토석류 사례조사로 인해 이동각 범위가 넓게 분포하나, 가장 빈도가 높은 이동각 범위는 10°에서 20°사이 존재하며 전체의 약 50%를 차지하는 것으로 분석되었다. 또한 평균 값은 18.1°로 분석되었다. 본 연구에서 수행한 총 11개 토석류 재해사례 분석을 통해 얻어진 이동각 범위는 10°에서 22°범위를 나타내며, 평균 값은 약 15°로 분석되었다. 국외 사례에 비해 다소 큰 경향을 나타내고 있다. 그러나 국내 강원지역 사례분석을 통해 제시된 이동각 범위 내에 포함되며, 평균 값 또한 유사한 범위 내에 있음을 알 수 있다.

Fig. 10(b)는 토석류 최대속도를 기존 국내·외 조사자료 및 현장 관측 자료와 비교하였다. 국외 여러 연구자(Scheidl and Rickenmann, 2011; Suwa et al., 2003; Takahashi, 1978; Cui et al., 1999)에 의해 분석된 최대속도는 4m/s에서 20m/s의 범위를 나타낸다. 본 연구지역과 동일한 지역을 대상으로 경험적 방법과 수치해석적 방법(Kang and Kim, 2015, 2016a)을 통해 산정된 최대속도 값은 각각 3.8~14.9 m/s와 2.6~20.7 m/s의 범위를 나타낸다. 본 연구에서 산정된 최대속도는 기존 연구에서 분석된 결과보다 다소 큰 값을 나타낸다. 그러나 2011년에 발생한 우면산 신동아와 래미안 아파트 지역의 토석류 영상자료 통해 분석된 속도는 각각 18m/s과 28 m/s (Park et al., 2013)로 본 연구에서 산정된 최대속도

값의 범위 내에 포함되고 있다. 또한 본 연구에서 분석된 우면산 래미안 아파트 지역의 토석류 최대속도는 30 m/s이다. 이러한 결과는 관측된 속도 값 28 m/s과 유사한 것으로 나타났다.

4.4 토석류 재해지역의 물리·지형적 특성과 한계 최대속도 및 이동각과의 관계

역해석을 통해 산정된 입력 매개변수(한계 최대속도, 이동각)와 토석류 재해지역의 물리적 특성과의 상관성을 파악하고자 한다. Fig. 11은 토석류 수평 이동거리(L), 침투유량(Q_p), 유역면적(A) 및 토석류 부피(M)와 한계 최대속도와 상관관계를 나타낸다. 토석류 재해지역의 물리적 특성과 본 연구에서 산정된 한계 최대속도와의 관계에 대해 회귀분석을 수행하였다. Fig. 11(a)의 토석류 수평 이동거리를 제외한 각 재해지역의 토석류 물리적 특성 자료는 Kang and Kim(2016a)의 연구에서 분석된 자료를 이용하였다. Fig. 11(a)의 토석류 수평 이동거리와 한계 최대속도의 상관관계를 제외하곤 비교적 낮은 상관계수(R^2)를 나타내었음에도 불구하고 한계 최대속도 값이 증가함에 따라 토석류 수평 이동거리, 침투유량, 유역면적 및 토석류 부피는 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Figs. 12(a)와 (b)는 사면부(channel slope) 및 퇴적부(debris flow fan)의 평균경사와 이동각과의 관계를 나타낸다. 이동각이 증가함에 따라 토석류 발생 유역의 사면부와 퇴적부 평균경사는 증가하는 경향을 나타낸다. 본 연구에서 분석한 11개 토석류 재해지역의 사면부와 퇴적부의 평균경사는 각각 15.3°~28.8°와 5.4°~11.5°의 범위를 나타낸다. 이와 같은 결과는 토석류 발생 예상지역의 지형적 특성을 통해 한계 최대속도와 이동각을 산정하는데 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 보다 더 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 다양한 재해사례에 대한 분석 자료가 추가되어야 한다.

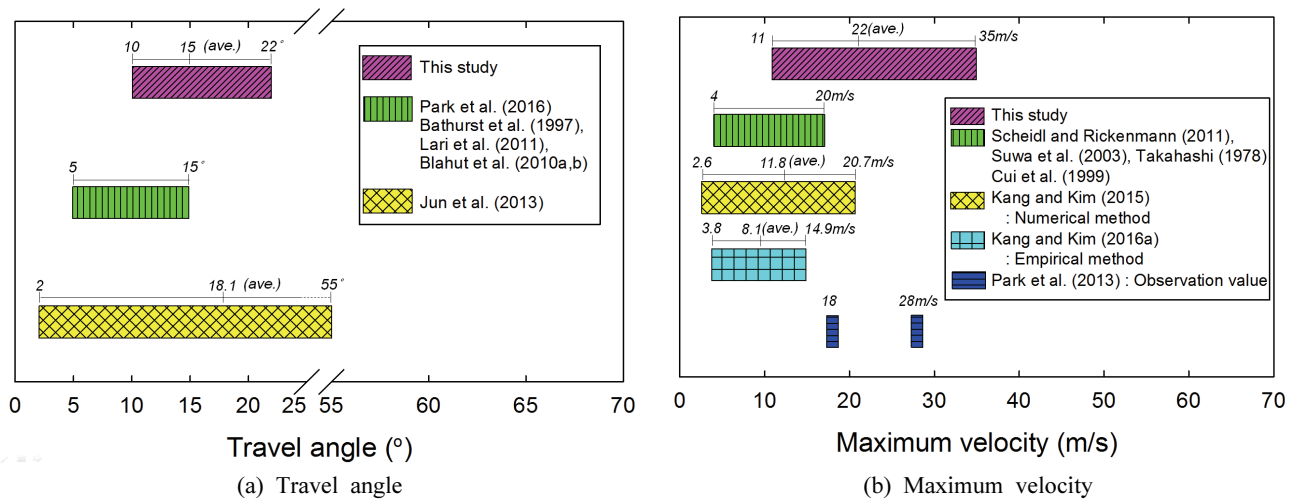


Fig. 10. Ranges of Travel Angle and Maximum Velocity

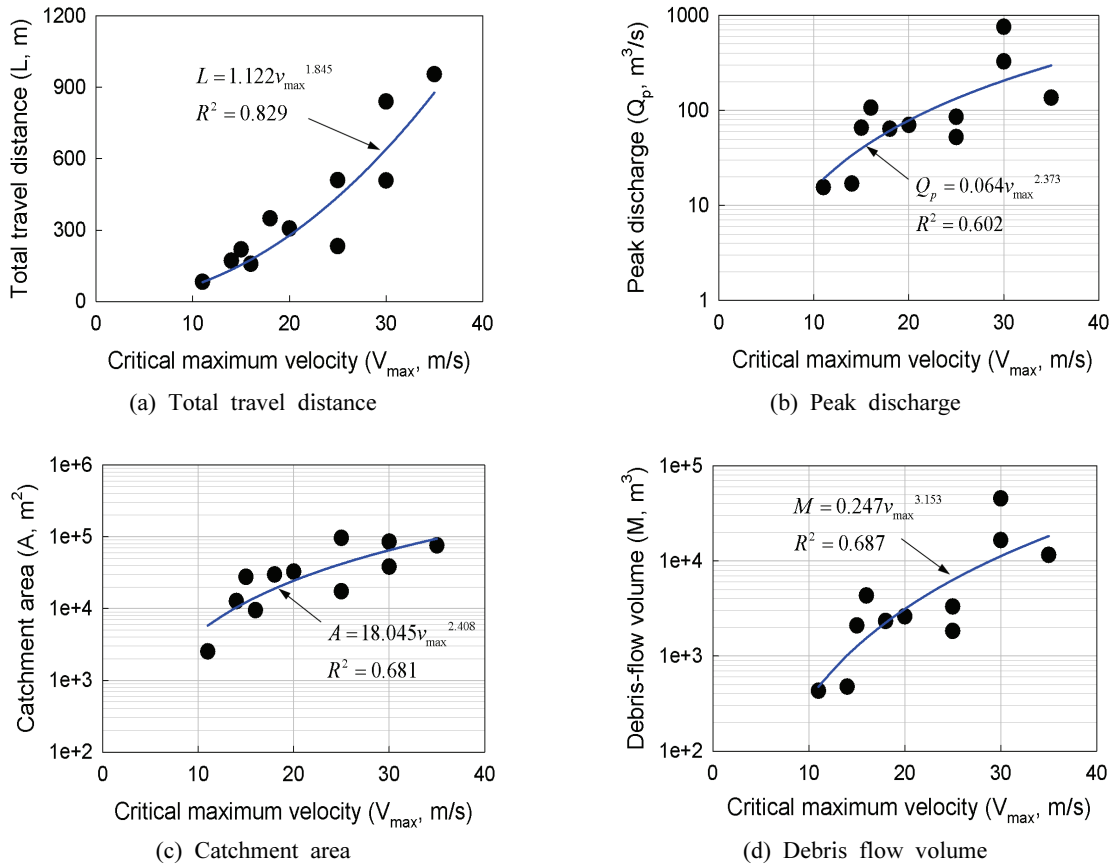


Fig. 11. Relationship Between Critical Maximum Velocity and Physical Characteristics of Debris Flow

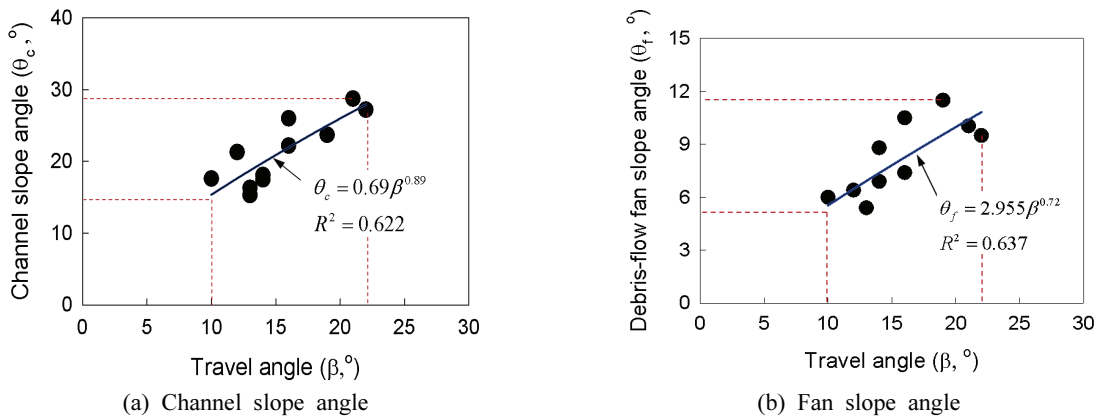


Fig. 12. Relationship Between Channel Slope Angle, Fan Slope Angle and Travel Angle

5. 결론

본 연구에서는 광역 토사재해 물리적 취약성 평가시 필요한 토석류 거동 해석을 위해 Flow-R 입력 매개변수(최대속도, 이동각)에 대한 분석을 수행하였다. Flow-R 입력 매개변수에 따른 민감도 분석을 통해 토석류 확산면적과 최대 운동에너지 변화 특성을 분석하였다. 2011년에 발생한 총 11개 토석류 재해 사례에 대해 Flow-R 모델을 이용하여

역해석을 수행하였고, 조사된 토석류 재해영역과의 비교를 통해 최적 입력 매개변수를 산정하였다. 또한 산정된 이동각과 최대속도를 기존 연구결과와 비교하였고, 산정된 최대속도와 토석류 재해지역의 물리적 특성과의 상관성에 대한 분석이 이루어졌다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

Flow-R 매개변수(최대속도, 이동각) 민감도 분석 결과 토석류 최대속도가 증가할수록 확산면적과 최대 운동에너지는 증가하나, 한계 최대속도 값 이상에서는 수렴하는 경향

을 나타낸다. 이와 같은 결과는 설정된 이동각 이상으로 토석류가 확산되지 않기 때문이다. 이동각이 증가함에 따라 토석류 확산면적은 감소하는 것으로 나타났으나, 최대 운동 에너지는 한계 이동각 이하에서는 일정한 값을 나타낸다.

사례 분석을 통해 산정된 총 11개 토석류 재해지역의 이동각은 10°~22°범위를 나타내며, 평균값은 약 15°로 분석되었다. 국외 사례에 비해 다소 큰 경향을 나타내고 있으나 국내 강원지역 사례분석을 통해 제시된 이동각 2°에서 55°(평균값 18.1°)의 범위 내에 포함된다.

Flow-R을 이용한 역해석과 조사된 토석류 재해영역과의 비교를 통해 산정된 총 11개 토석류 재해지역의 한계 최대속도 값은 11 m/s에서 35 m/s범위를 나타내며, 평균 값은 약 22 m/s로 분석되었다.

최대속도 값이 증가함에 따라 토석류 수평이동 거리, 침투 유량, 유역면적 및 부피는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 이동각이 증가함에 따라 사면부(15.3°~28.8°)와 퇴적부(5.4°~11.5°)의 평균경사는 증가하는 경향을 나타낸다. 이와 같은 결과는 토석류 발생 예상지역의 지형적 특성을 통해 한계 최대속도와 이동각을 산정하는데 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 국내 토석류 사례를 기반으로 Flow-R 입력 매개변수에 대한 분석이 수행되었다. 보다 더 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 다양한 재해사례에 대한 분석 자료가 추가되어야 한다. 그럼에도 불구하고 본 연구결과는 토사재해 물리적 취약성 평가를 위한 광역 토석류 해석 시 필요한 Flow-R 입력 매개변수 산정에 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구S04)에 의해 수행되었습니다.

References

Bathurst, J.C., Burton, A., and Ward, T.J. (1997) Debris flow runout and landslide sediment delivery model tests. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 123, No. 5, pp. 410-419.

Berti, M., and Simoni, A. (2007) Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships. *Geomorphology*, Vol. 90, pp. 144-161.

Blahut, J., Horton, P., Sterlacchini, S., and Jaboyedoff, M. (2010a) Debris flow hazard modelling on medium scale: Valtellina di Tirano, Italy. *Natural Hazards Earth System Sciences*, Vol. 10, pp. 2379-2390.

Blahut, J., van Westen, C.J., and Sterlacchini, S. (2010b) Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology*, Vol. 119, pp. 36-51.

Chae, B.G., Choi, J.h., and Jeong, H.K. (2016) A feasibility study of a rainfall triggering index model to warn landslides in Korea. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 26, No. 2, pp. 235-250.

Cho, S.E. (2015) Surficial stability analysis by the Green-Ampt infiltration model with bedrock boundary condition. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 1, pp. 131-142.

Choi, J.R., Jee, Y.K., and Park, I.C. (2014) A study on establishing methodology of integrated urban climate and disaster vulnerability assessment considering debris flows damage. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 6, pp. 185-192.

Crosta, G.B., Imposimato, S., and Roddeman, D.G. (2003) Numerical modelling of large landslides stability and runout. *Natural Hazards Earth System Sciences*, Vol. 3, pp. 523-538.

Cui, P., Wei, F.Q., and Li, Y. (1999) Sediment transported by debris flow to the lower Jiansha river. *International Journal of Sediment Research*, Vol. 14, No. 4, pp. 67-71.

Guinau, M., Vilajosana, I., and Vilaplana, J.M. (2007) GIS-based debris flow source and runout susceptibility assessment from DEM data: a case study in NW Nicaragua. *Natural Hazards Earth System Sciences*, Vol. 7, pp. 703-716.

He, Y.P., Xie, H., Cui, P., Wei, F.Q., Zhong, D.L., and Gardner, J.S. (2003) GIS-based hazard mapping and zonation of debris flows in Xiaojiang Basin, southwestern China. *Environmental Geology*, Vol. 45, No. 2, pp. 286-293.

Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., and Zimmermann, M. (2013) Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards Earth System Sciences*, Vol. 13, pp. 869-885.

Hungr, O. (1995) A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, No. 4, pp. 610-623.

Hussin, H., Chen, L., Ciurean, R., van Westen, C., Reichenbach, P., and Sterlacchini, S. (2014) Analysing changes in landslide risk using multi temporal landslide susceptibility and run-out modeling on a regional scale. *International*

- Conference, Analysis and Management of Changing Risks for Natural Hazards*, Italy, pp. 1-11.
- Iovine, G., D'Ambrosio, D., and Di Gregorio, S. (2005) Applying genetic algorithms for calibrating a hexagonal cellular automata model for the simulation of debris flows characterised by strong inertial effects. *Geomorphology*, Vol. 66, pp. 287-303.
- Iverson, R.M. (1997) The physics of debris flows. *Review of Geophysics*, Vol. 35, No. 3, pp. 245-296.
- Jaboyedoff, M., and Labiouse, V. (2011) Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards Earth System Sciences*, Vol. 11, pp. 819-828.
- Jun, K.J., Kim, G.H., and Yune, C.Y. (2013) Analysis of debris flow type in Gangwon Province by database construction. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 33, No. 1, pp. 171-179.
- 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.
- Kang, H.S., and Kim, Y.T. (2015) Study on physical vulnerability curves of buildings by numerical simulation of debris flow. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 5, pp. 155-167.
- Kang, H.S., and Kim, Y.T. (2016a) The physical vulnerability of different types of building structure to debris flow events. *Natural Hazards*, Vol. 80, No. 3, pp. 1475-1493.
- Kang, H.S., and Kim, Y.T. (2016b) A study on warning level-based-landslide triggering rainfall criteria considering weathered soil type and landslide type. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 2, pp. 341-350.
- Kang, H.S., and Kim, Y.T. (2016c) Rheological properties of loose sands subjected to upward flow. *Canadian Geotechnical Journal*, 10.1139/cgj-2016-0171.
- Kang, H.S., Pradhan, A.M.S., and Kim, Y.T. (2016) Physical vulnerability assessment of buildings impacted by debris flow. *International Conference on Civil and Environmental Engineering 2016*, pp. 54-55.
- Kang, S.H., Lee, S.R., Nikhil, V.V., and Park, J.Y. (2015) Analysis of differences in geomorphological characteristics on initiation of landslides and debris flows. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 2, pp. 1-10.
- Kappes, M.S., Malet, J.P., Remaître, A., Horton, P., Jaboyedoff, M., and Bell, R. (2011) Assessment of debris-flow susceptibility at medium-scale in the Barcelonnette Basin, France. *Natural Hazards Earth System Sciences*, Vol. 11, pp. 627-641.
- Lari, S., Crosta, G.B., Frattini, P., Horton, P., and Jaboyedoff, M. (2011) Regional-scale debris-flow risk assessment for an alpine valley. In: 5th international conference on debris-flow hazards mitigation, Padua, Italy. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, pp. 933-940.
- Lee, J.H., Lee, J.S., Lee, S.O., and Jun, H.D. (2016) Methodological Approaches to the Vulnerability Assessment for the Effect Quantification of Debris Flow Disaster Mitigation Facilities. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 3, pp. 359-367.
- Melelli, L., and Taramelli, A. (2004) An example of debris-flows hazard modeling using GIS. *Natural Hazards Earth System Sciences*, Vol. 4, pp. 347-358.
- 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.
- Park, D.W., Lee, S.R., Nikhil, N.V., Kang, S.H., and Park, J.Y. (2013) Debris flow hazard zonation by probabilistic analysis (MT. Woomyeon, Seoul, Korea). *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 2, Issue 6, pp. 2381-2390.
- Park, D.W., Lee, S.R., Vasu, N.N., Kang, S.H., and Park, J.Y. (2016b) Coupled model for simulation of landslides and debris flows at local scale. *Natural Hazards*, Vol. 81, No. 3, pp. 1653-1682.
- Park, Y.K., Kim, J.S., Jo, D.J., and Kim, S.D. (2015) Urban mud and debris flow disaster vulnerability assessment associated with landslide hazard map: application to Busan, Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 5, pp. 283-289.
- Park, Y.K., Yang, J.S., and Kim, J.S. (2016a) Social and economic disaster vulnerability assessment considering urban characteristics of Seoul. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 1, pp. 337-345.
- Pradhan, A.M.S., Kang, H.S., Lee, G.S., Paolo, T., and Kim, Y.T. (2016) Shallow landslide hazard modeling by incorporating heavy rainfall statistics and quasi-dynamic wetness index: a case study from Korean mountain. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, Vol. 2, No. 27, pp. 1012-1016.

- Quan Luna, B., Blahut, J., Camera, C., van Westen, C., Apuani, T., Jetten, V., and Sterlacchini, S. (2014) Physically based dynamic run-out modelling for quantitative debris flow risk assessment: a case study in Tresenda, northern Italy. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 72, No. 3, pp. 645-661.
- Ryu, J.H., and Han, S.H. (2016) Determining the priority of investment by risk assessment for slopes. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 3, pp. 161-170.
- Scheidl, C., and Rickenmann, D. (2011) TopFlowDF - A simple GIS based model to simulate debris-flow runout on the fan. *5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, Padua, Italy, pp. 253-262.
- Suwa, H., Akamatsu, J., and Nagai, Y. (2003) Energy radiation by elastic waves from debris flows. *Proc. 3rd Inter. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, pp. 895-904.
- Takahashi, T. (1978) Mechanical characteristics of debris flow. *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 104, No. 8, pp. 1153-1169.
- van Westen, C.J., Kappes, M.S., Luna, B.Q., Frigerio, S., Glade, T., and Malet, J.-P. (2014) Medium-scale multi-hazard risk assessment of gravitational processes. *in Mountain Risks: From Prediction to Management and Governance*, Springer, Netherlands, pp. 201-231.
- van Westen, C.J., van Asch, T.W.J., and Soeters, R. (2006) Landslide hazard and risk zonation - why is it so difficult?. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 65, No. 2, pp. 167-184.
- Yoon, S., Lee, S.R., Kang, S.H., and Park, D.W. (2015) A statistical mobilization criterion for debris-flow. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 31, No. 6, pp. 59-69.

| | |
|-----------------|----------------|
| Received | April 10, 2017 |
| Revised | April 12, 2017 |
| Accepted | June 5, 2017 |

