

가능 최대강수량에 의한 토석류 범람 예측

Prediction of a Debris Flow Flooding Caused by Probable Maximum Precipitation

김 연 중* / 윤 종 성** / Kohji Tanaka*** / 허 동 수****

Kim, Yeon-Joong / Yoon, Jung-Sung / Kohji, Tanaka / Hur, Dong-Soo

Abstract

In recent years, debris flow disaster has occurred in multiple locations between high and low mountainous areas simultaneously with a flooding disaster in urban areas caused by heavy and torrential rainfall due to the changing global climate and environment. As a result, these disasters frequently lead to large-scale destruction of infrastructures or individual properties and cause psychological harm or human death. In order to mitigate these disasters more effectively, it is necessary to investigate what causes the damage with an integrated model of both disasters at once. The objectives of this study are to analyze the mechanism of debris flow for real basin, to determine the PMP and run-off discharge due to the DAD analysis, and to estimate the influence range of debris flow for fan area according to the scenario. To analyse the characteristics of debris flow at the real basin, the parameters such as the deposition pattern, deposit thickness, approaching velocity, occurrence of sediment volume and travel length are estimated from DAD analysis. As a results, the peak time precipitation is estimated by 135 mm/hr as torrential rainfall and maximum total amount of rainfall is estimated by 544 mm as typhoon related rainfall.

Keywords : debris flow, numerical simulation, DAD analysis, PMP (probable maximum precipitation)

요 지

최근 기후 변화에 따른 कैल라성 호우에 의한 전 세계 도심 속 산지 지역에서 토석류의 발생 빈도수가 증가하고 있으며, 이 결과 더 많은 인명피해와 주요 시설물 파괴 등의 피해가 사회적 큰 문제로 대두되고 있다. 현재까지는 도심지역 재해 관리 및 피난 계획 수립 시, 토석류 범람은 별도로 취급되어 피난 권고 시스템이 구축되고 있으나 피난계획 수립 시, 재해 발생 가능성을 고려한 여러 재해를 기반으로 통합적인 대책 수립이 필요하며 향후, 현재보다 더 큰 강우가 발생할 가능성이 굉장히 크며 이에 대한 대책 수립의 중요성 또한 강조되고 있다. 본 연구에서는 실제 지역에서의 토석류의 유동형태를 파악하고, 외력조건으로 DAD 분석을 통해 가능최대 강우량과 유출량을 산정하며 주거지 지역에서의 토석류 영향범위 파악을 목적으로 한다. 실제 지역에서의 토석류 특성을 분석하기 위해 토석류 흐름 패턴, 퇴적 깊이, 도달속도, 발생된 토사량 및 토석류 이동거리를 평가했다. DAD 해석 결과, 피크 시간 강우량은 국지성 호우에 의해 약 135 mm, 24시간 누적 최대강우량은 태풍에 의한 호우로 약 544 mm로 조사 되었다. 또한 토석류에 의한 영향범위를 파악 하였다.

핵심용어 : 토석류 수치해석, DAD 해석, 가능최대강수량

* (주)건설기술연구소 수자원시스템부 연구원 (e-mail: k-yonj@ctie.co.jp)

Researcher, Water Resource System Division, CTI Engineering Co., Ltd., Osaka, Japan

** 교신저자, 인제대학교 토목도시공학부 정교수 (e-mail: civyunjs@inje.ac.kr, Tel: 82-55-320-3434)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil and Urban Eng., Inje University, Gimhae, Korea

*** (주)건설기술연구소 수자원시스템부 (e-mail: kj-tanak@ctie.co.jp)

Researcher, Water Resource System Division, CTI Engineering Co., Ltd., Osaka, Japan

**** 경상대학교 해양토목과 정교수 (e-mail: dshur@gnu.ac.kr)

Professor, Dept. Ocean Civil Eng., Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

1. 서론

토석류는 다소 여러 크고 작은 토사 입자와 유수가 혼합하여 중력에 의해 일종의 연속유체와 유사한 흐름이 발생하는 유동현상으로, 토석류를 구성하는 매질의 입경과 분포 특성, 토석류 농도, 유로경사, 유로 폭 등의 환경요소에 따라 흐름의 성질이 크게 변화하며 일반 유체보다 유체력이 굉장히 큰 흐름이다. 토석류 발생 빈도수는 다른 토사재해(landslide, flope failure etc.)에 비해 크지는 않지만 토석류의 피해는 다른 재해보다 크며 특히 토석류에 의한 인명피해가 가장 큰 토사재해이다(Kim et al., 2013). 최근 이상기후에 의해 여러 방재 시설물의 설계 강우를 웃도는 강우가 빈번히 발생하고 있으며 2011년에 발생한 집중호우에 의한 우면산 토석류 재해와 같이 도심지 속 산지지역으로부터 인간 활동지역으로 직접적인 토석류가 발생할 경우 그 피해 규모는 굉장히 크며, 향후 기존의 강우보다 더 큰 강우가 발생 할 가능성 또한 증가한다는 연구 보고서 등이 발표되고 있다. 따라서 사전에 충분한 검토를 바탕으로 대책 마련이 시급한 상황에 처해있다.

토석류는 지구 역사상 가장 오래전부터 발생된 재해 중 하나일 것이다. 한국에서는 주로 도심지로부터 비교적 멀리 떨어진 산악지역에서 발생되어 직접적인 피해가 비교적 작아 다른 재해에 비해 부각 되지는 않았다. 하지만, 도시 인프라가 시작 되면서부터 산간지역에서 중심 도심지로 인구가 집중되고 도심지 인근 산악지역 주변에 많은 주민과 주요 시설물들이 집중되었다. 특히 한국에서는 2011년에 발생한 우면산 토석류 대참사로 인해 사회적 이슈로 부각되어 많은 관심과 연구가 이루어지고는 있지만 아직 토석류 전반적인 연구가 부족한 상황이다. 이에 반에 일본에서는 1980년 중반부터 토석류에 대한 실험적 연구(Ashida and Takahashi, 1980)와 현장 모니터링(Okuda et al., 1977) 등을 바탕으로 많은 연구가 활발히 진행되고 있으며 현재까지도 매년 발생된 재해분석을 바탕으로 많은 데이터 축적과 더불어 발전된 기술력을 바탕으로 재해 대책수립 등 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 Takahashi (1977)는 Bagnold (1954)의 관성영역에 대한 구성법칙을 이용해 토석류의 유속분포 및 저면평균적 농도식을 제안함으로써 토석류의 전반적인 메커니즘을 구축하였다(Takahashi, 1991). 이후 Egashira et al. (1997), Nakagawa et al. (2003) 등에 의해 독자적인 구성법칙을 제안하고 추가적인 연구가 진행 되었지만 토석류의 흐름 특성상 여러 매개체가 복합적으로 구성되어 있는 흐름으로서 그 성질이 매우 복잡하며 수치 시뮬레이션 해석에

있어 아직까지도 많은 기초연구에서 해명되어 할 중요한 과제가 많이 남아 있는 상황이다.

토석류는 주로 급경사 산지 상류지역(하상경사 18°이상 지역)에서 계상퇴적토사 위에 유수가 발생하여 퇴적물을 침식시켜 토석류로 발달, 강우에 의해 상류지역의 사면 붕괴 및 산사태로 인해 직접적으로 그 토사가 유수와 함께 하류지역으로 흐름이 발생되어 토석류로 발달된다. 이와 같이 토석류는 강우특성과 아주 밀접한 관계를 갖고 있으며, 최근 세계적으로 국지성 집중강우에 의한 토석류 범람뿐만 아니라 홍수(내·외수)범람에 의한 침수가 동시에 다발적으로 여러 재해가 복합적으로 해 기존의 피해보다 더 큰 피해가 초래되고 있으며, 피해 저감을 위해 많은 소프트 및 하드대책이 수립되고 있다. 발생하는 여러 재해에 대해 각각의 분석 및 대책수립은 활발히 진행되고 있으나, 통합적인 재해관리 및 대책수립은 아직까지 많은 어려움이 내포되어 있다. 뿐만 아니라 이상기후에 의한 불규칙적인 강우패턴 및 지금까지 경험하지 못한 강우 발생 가능성 증가 및 예측이 점점 더 어려워지고 있다. 하지만 방재대책 구축 시 여러 재해의 발생 가능성을 인지하고 각각의 재해 특성, 영향범위 및 대상으로 하는 지역특성을 충분히 고려해 통합적인 대책이 강구되어야 한다. 여기서 재해범위의 규모산정 및 어느 재해를 고려할 것인가 등 많은 과제가 내포되어 있지만 통합적인 방재대책 구축은 반드시 필요한 과제 중 하나이다.

본 연구에서는 통합적인 방재대책 구축을 최종 목적으로, 우선 토석류에 의한 재해영향평가를 목적으로 한다. 우선 실제지역을 대상으로 해석 가능한 평면 2원 토석류 모델을 구축하였으며, 외력 조건인 강우량 산정은 검토대상 지역 주변 전국 합성레이더 강우데이터(11년간)를 이용해 아직 경험하지 못한 최대강우를 산정 및 지역적인 특성을 고려하기 위해 DAD (Depth-Area-Duration analysis) 해석을 실시하여 가능최대강수량(PMP)을 산정 및 합성합리식(Qian et al. 2012)을 이용하여 토석류 발생 예상지역의 유출량을 계산하였다. 또한 직접피해지역을 대상으로 계획 시나리오에 의한 발생 토사량, 이동속도 및 영향범위 등의 토석류 특성을 파악하였다.

2. DAD analysis

세계적인 이상기후로 인해 향후 과거에 발생한 강우강도보다 더 강한 강우가 내습할 확률이 굉장히 크며 피해를 최소화하기 위해 사전에 대책을 수립해야한다. 최근 발생하는 집중호우는 강우 패턴이 굉장히 불일정하여 그

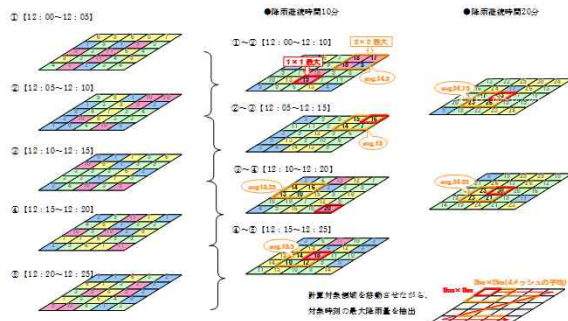
예측이 굉장히 어려워지고 있으며 기존의 침수지역 이외에서도 발생할 가능성이 크며 이로 인해 많은 인명 및 재산피해 리스크가 매우 크다. 강우예측 시, 검토대상지역의 유역평균 강수량은 면적이나 강우계속시간에 따라 크게 변동되며 유역면적이 비교적 작다면 단시간의 강수량이, 유역면적이 크면 장시간의 강수량이 문제가 되므로 관측 기록에서 우량(depth), 면적(area), 지속시간(duration)의 상호관계를 파악하는 것이 중요하다.

DAD 해석은 확률적으로 타당한 강우강도와 유역면적에서 강우계속시간을 결정해, 그 홍수 피크 유량을 계산하고 수로 또는 저수시설 등의 수리시설의 제원을 결정할 때 자주 이용되며 강우-유출 모형을 이용하여 유출량 산정 시 면적 강수량의 정확한 추정이 필요하다(Kim and Won, 2004). DAD 해석은 세계 기상기구(WMO)에 가능최대강우량 추정방법으로 소개된 방법 중 하나이며, 본 연구에

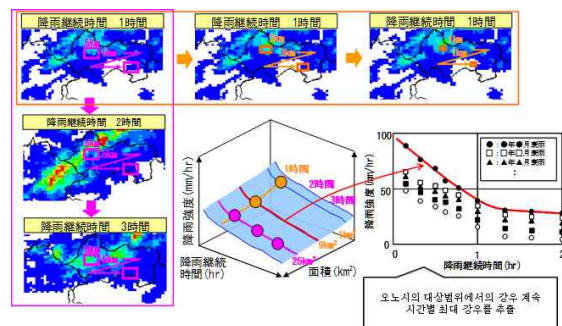
서는 검토대상지역에서의 최대강우량을 산정하기 위해 면적강수량의 정확한 추정이 비교적 가능한 전국합성 레이더 우량 데이터를 이용해 강우지속시간, 면적 및 강수량의 관계를 분석하고 DAD 특성을 감안한 최대강우량을 아래의 방법으로 산정하였으며(Fig. 1) 계산영역 및 계산조건을 Fig. 2에 나타내었다.

[DAD 해석방법]

- ① 2003년 7월 1일 00시를 출발 시각으로 대상영역내의 대상면적, 대상 강우 계속시간우량을 산출한다.
- ② ①에서 산출된 우량 속에서 시시각각의 최대인 강우량에 대해 유역을 이동시켜 탐색한다.
- ③ ①~②의 순서를 반복하는 대상기간내의 시계열별 강우량을 산출한다.
- ④ 강우 계속 시간, 대상유역을 바꾸고 ①~③의 계산

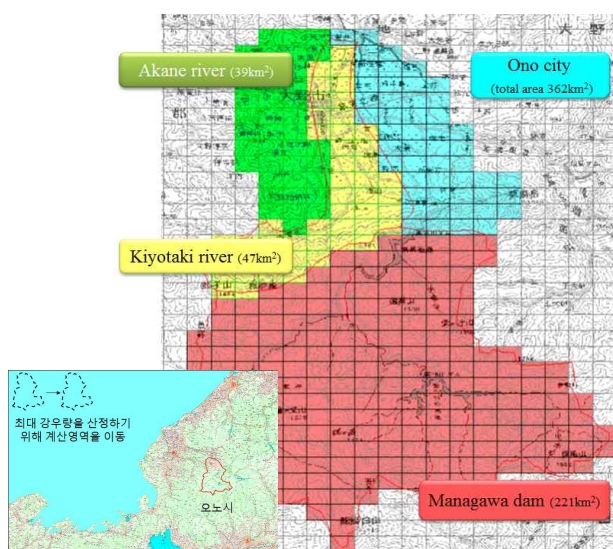


(a) Analysis method



(b) Determination of the max rainfall

Fig. 1. DAD Analysis Method



(a) Calculation area

Study basin	Rainfall duration
	10min
	20min
	30min
	1hr
①Akane river	2hr
②Kiyotaki river	3hr
③Managawa river	4hr
④Ono city (①+②+③)	5hr
	6hr
	12hr
	24hr
	48hr

(b) Calculation condition

Fig. 2. Target Basin of Ono City

을 반복하고 강우 계속시간, 유역별 최대 강우량을 산출한다.

검토대상지역의 11년간(레이더 관측기간: 2003~2013, 관측간격: 5분, mesh size: 1 km²)의 데이터 취득 가능한 기간을 계산 대상기간으로 선정, 매년 홍수기(5~11월)를 대상으로 국지성 강우, 전선성 강우 그리고 태풍성 강우에 대해 최대강우를 추출하였다. 또한 치수계획에서 채택되고 있는 후쿠이현(Hufui Prefecture) 강우 강도식 10~200년 중앙 집중형 파형을 작성해 비교 검토하였으며, 검토대상지역인 오노시를 총 4개의 유역으로 분리하여 DAD 해석을 실시, 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 토석류 해석 유역인 Akane 유역에서는 피크 시간 강우량은 국지성 호우에 의해 약 135 mm, 24시간 누적 최대강우량은 태풍에 의한 호우로 약 544 mm로 조사 되었다(Fig. 3). 추출한 강우샘플이 치수계획규모의 시간우량을 웃도는 국지성 또는 전선성 강우가 과거 10년간 약 30번 정도 발생하였다.

검토대상지역의 11년간(레이더 관측기간: 2003~2013, 관측간격: 5분, mesh size: 1 km²) 매년 홍수기(5~11월)를 대상으로 국지성 강우, 전선성 강우 그리고 태풍성 강우에 대해 최대강우를 추출하였다. 또한 치수계획에서 채택되고 있는 후쿠이현(Hufui Prefecture) 강우 강도식 10~200년 중앙 집중형 파형을 작성해 비교 검토하였다. 총

4개의 유역으로 분리하여 DAD 해석을 실시하였다. 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 토석류 해석 유역인 Akane 유역에서는 피크 시간 강우량은 국지성 호우에 의해 약 135 mm, 24시간 누적 최대강우량은 태풍에 의한 호우로 약 544 mm로 조사 되었다(Fig. 3). 또한 추출한 강우샘플이 치수계획규모의 시간우량을 웃도는 국지성 또는 전선성 강우가 과거 10년간 약 30번 정도 발생하였다. (중복)

본 연구에서는 최대강우에 의해 발생 가능한 토석류 범람에 대한 영향 검토를 목적으로 DAD 해석 결과를 이용하여 Akane 유역에서 발생 가능 유출 토사량을 일본국토기술정책종합연구소(NILIM, 2007)에서 제시한 Eq. (1)에 의해 산정하였으며 그 결과 유출 가능 토사량은 약 251,671m³으로 조사되었다. 또한 토석류 피크유량(Q_{sp}) Eq. (2)을 이용하여 외력을 산정하였다.

$$P_v = \frac{10^3 R_T A}{1-\lambda} \left(\frac{C_d}{1-C_d} \right) f_r \quad (1)$$

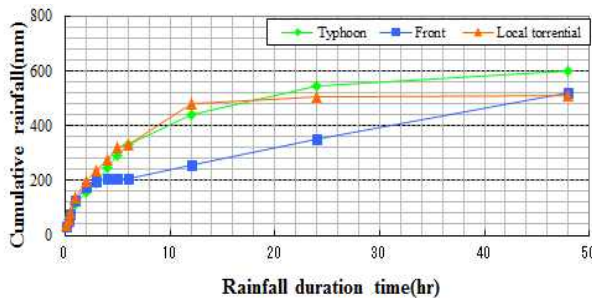
$$Q_{sp} = \frac{C_*}{C_* - C_d} Q_p \quad (2)$$

$$f_r = 0.05(\log A - 2.0)^2 + 0.05 \quad (3)$$

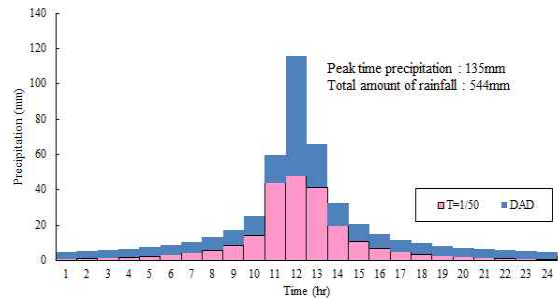
여기서, R_T는 24시간 누적강우량(mm), A는 유역면적(km²), λ는 공극율, C_d는 유동중 토석류의 용적토사농도

Table 1. Results of DAD analysis

Duration	Cumulative rainfall (mm)											
	10min	20min	30min	1hr	2hr	3hr	4hr	5hr	6hr	12hr	24hr	48hr
Managawa	21	40	60	99	153	193	221	244	252	335	430	545
Kiyotaki	32	60	79	116	181	218	260	283	294	423	501	619
Akane	36	59	83	135	195	235	278	320	332	482	544	602
Ono city	19	36	53	86	143	179	204	222	248	339	426	536



(a) Cumulative rainfall (10 min)



(b) Estimated of hourly precipitation

Fig. 3. Results of the DAD analysis

(토석류 발생지역에서의 토석류 농도로 산정), f_r 은 유출 보정율, $C^*(=0.65)$ 는 토석류 최대 용적 토사농도 그리고 Q_p 는 유출량으로 합성 합리식을 이용하여 계산하였다.

3. 토석류 수치모델

토석류는 고체입자와 액체간의 혼합물질로 구성된 흐름으로 토석류의 유동현상은 각각의 상호작용을 고려할 수 있는 모델의 구성이 필요 하지만 현재 수치시물레이션 해석에 있어 일종의 유동장 해석으로 모델(Takahashi, 1991)을 구성하고 있다. 토석류의 규모 및 성질을 예측할 시, 다음의 사항이 고려되어야 한다(Nakagawa et al., 1996). ① 예측 모델 자체의 정밀도 문제, ② 퇴적토층두께 및 입도분포 등의 현장조건, ③ 강우조건설정, ④ 대상으로 하는 강우에 대해 토석류의 발생 가능성과 발생할 경우 규모와 위치 예측에 대한 문제점 등이 있다. 본 연구에서 사용된 토석류 모델의 정밀도 평가는 수리모형실험에 따른 모델의 적용성 평가(Kim et al., 2012)를 수행 및 현장조사를 통해 취득 가능한 물성치를 산정하였다. 토석류의 흐름이 완전히 정지하기까지 일종의 연속체로 취급이 가능한 운동량 방정식 및 연속방정식 등을 기초로 토석류 내의 유체와 고체간의 상호작용에 의한 효과가 고려 및 현장적용이 가능한 평면 2차원 토석류 모델을 개발하였다.

3.1 토석류 모델

3.1.1 기초방정식

기초방정식으로서 토사와 물이 혼연일체가 된 흐름으로 데카르트 좌표계에서의 토석류의 기초방정식은 x , y 방향의 운동량 방정식 Eqs. (4) and (5)와 전 체적에 대한 연속방정식 Eq. (6), 조립자 Eq. (7) 및 세립자 Eq. (8)에 관한 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \beta \frac{\partial(vN)}{\partial y} = gh \sin \theta_{bxo} - gh \cos \theta_{bxo} \frac{\partial(z_b + h)}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \beta \frac{\partial(vN)}{\partial y} = gh \sin \theta_{byo} - gh \cos \theta_{byo} \frac{\partial(z_b + h)}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = i_b \quad (6)$$

$$\frac{\partial(C_L h)}{\partial t} + \frac{\partial(C_L M)}{\partial x} + \frac{\partial(C_L N)}{\partial y} = \begin{cases} i_b C_{*L} & (i_b \geq 0) \\ i_b C_{*DL} & (i_b < 0) \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{\partial\{(1-C_L)C_F h\}}{\partial t} + \frac{\partial\{(1-C_L)C_F M\}}{\partial x} + \frac{\partial\{(1-C_L)C_F N\}}{\partial y} = \begin{cases} i_b(1-C_{*L})C_{*F} & (i_b \geq 0) \\ i_b(1-C_{*DL})C_{*F} & (i_b < 0) \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + i_b = 0 \quad (9)$$

여기서, $M=uh$, $N=vh$: x , y 방향의 유량 플럭스, u , v 는 평균유속, h 는 수위, β 는 운동량 보정계수(=1.25), g 는 중력가속도, $\rho_t = \sigma C_L + \rho_m(1-C_L)$ 는 입자와 물이 혼합된 밀도(\approx 토석류 밀도), σ 는 토사입자 밀도, ρ_m 는 물의 밀도, τ_{bx} , τ_{by} 는 x , y 방향의 저면전단응력, i_b 는 퇴적($i_b < 0$) 및 침식($i_b \geq 0$)속도, C_L , C_F 는 토석류 속의 총 입자성분의 조립자 및 세립자성분의 체적농도, C_{*L} , C_{*F} 는 각각 바닥면 퇴적층 안의 조립자 및 세립자농도, C_{*DL} 은 입자가 흐름으로부터 분리해서 퇴적하는 경우의 퇴적층 안의 농도이다. z_b 는 침식 또는 퇴적 깊이로서 Eq. (9)을 이용한다.

3.1.2 저면전단응력(Bottom shear stress)

토석류의 전체 전단응력은 점착력(C_o), τ_y (shear yield stress), μ (coefficient of viscosity)와 du/dz (velocity gradient), 입자간의 충돌(collision between the particles) 그리고 난류 혼합(turbulent mixing)에 의해 발생하는 응력의 합으로 표현할 수 있다. Takahashi (1991)는 토석류 구성 방정식을 2-D 모델에 적용하기 위해 다음의 근사식을 제안하였다.

$$\tau = C_o + \tau_y + \mu \left(\frac{du}{dz} \right) + \quad (10)$$

$$A(1-e^2)\sigma \frac{1}{b} d^2 \left| \frac{du}{dz} \right| \left(\frac{du}{dz} \right) - \overline{\rho u' v'}$$

$$\tau = \tau_y + a_i \sin \alpha \left\{ \left(\frac{C_*}{C_L} \right)^{1/3} - 1 \right\}^{-2} \sigma d_m^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (11)$$

$$\tau_y = p_s \tan \phi \quad (12)$$

$$p_s = f(C_L)(\sigma - \rho) C_L g(h - z) \cos \theta \quad (13)$$

$$f(C_L) = \begin{cases} \frac{C_L - C_3}{C_* - C_3} ; C_L > C_3 \\ 0 ; C_L \leq C_3 \end{cases} \quad (14)$$

여기서, a_i 는 실험정수, a 는 입자 충돌각($a_i \sin a = 0.02$), p_s 는 static pressure 이며, d_m 은 입자끼리의 충돌에 의해 유지되고 있는 입자의 대표입경이다(= d_{50}) 그리고 C_3 는 한정 토사농도(=0.48)로서 토사농도에 따른 저면전단응력 식은 다음과 같다.

[Stony debris flow; $C_L > 0.4C_*$]

$$\tau_{bx} = \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \tau_{yx} + \rho_m f_b u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (15)$$

$$\tau_{by} = \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \tau_{yy} + \rho_m f_b v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (16)$$

$$\tau_{yx} = f(C_L)(\sigma - \rho) C_L g h \cos \theta_x \tan \phi \quad (17)$$

$$\tau_{yy} = f(C_L)(\sigma - \rho) C_L g h \cos \theta_y \tan \phi \quad (18)$$

여기서, τ_{yx} , τ_{yy} 는 x , y 방향의 shear yield stress (전단항복응력)이며, f_b 는 저항계수로서 다음과 같다.

$$f_b = \frac{1}{8} \frac{\sigma / \rho_m}{\{(C_*/C_L)^{1/3} - 1\}^2} \left(\frac{d_m}{h} \right)^2 \quad (19)$$

[Immature debris flow; $0.02 \leq C_L \leq 0.4C_*$]

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_t}{0.49} \left(\frac{d_m}{h} \right)^2 u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (20)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_t}{0.49} \left(\frac{d_m}{h} \right)^2 v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (21)$$

[Turbulent flow; $C_L < 0.02$] (위치수정)

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (22)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (23)$$

3.1.3 침식·퇴적 속도(Erosion and deposition velocity)

퇴적층 침식 및 퇴적은 하상면의 포화도, 흐름의 토사농도 및 평형농도와 매우 밀접한 관계를 갖고 있으며, 그

성질 또한 매우 복잡하며 본 연구에서는 Takahashi et al. (1992)이 제시한 근사식을 이용하였다.

[Erosion velocity; $C_L \leq C_\infty$]

$$i_b = \delta_e \frac{C_\infty - C_L}{C_* - C_\infty} \frac{\sqrt{u^2 + v^2} h}{d_m} \quad (24)$$

[Deposition velocity; $C_L > C_\infty$]

$$i_b = \delta_d \left(1 - \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{p U_e} \right) \frac{C_\infty - C_L}{C_{*DL}} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (25)$$

여기서, δ_e (=0.007), δ_d (=1.0)는 침식·퇴적 계수를 나타내며, p 는 실험정수(=2/3), θ_e 는 하상경사, C_∞ 는 평형농도 그리고 U_e 는 토석류의 평형속도(equilibrium velocity)로서 다음의 식으로 표현된다.

$$U_e = \frac{2}{5d_m} \left[\frac{g \sin \theta_e}{a \sin \alpha} \left\{ C_L + (1 - C_L) \frac{\rho_m}{\sigma} \right\} \right]^{1/2} \left\{ \left(\frac{C_{*DL}}{C_L} \right) - 1 \right\} h^{3/2} \quad (26)$$

$$\tan \theta_e = \frac{C_L(\sigma - \rho_m) \tan \phi}{C_L(\sigma - \rho_m) + \rho_m} \quad (27)$$

3.1.4 평형 농도식(Equilibrium sediment concentration)

평형 상태에서의 농도식은 하상구배에 따라 자갈형 토석류(stony debris flow), 소류형 토석류(immature debris flow) 그리고 난류형 토석류(turbulent water flow)로 다음의 식으로 적용하였다(Nakagawa et al., 2003).

[Stony debris flow occurs; $\tan \theta_w > 0.138$]

$$C_\infty = \frac{\tan \theta_w}{(\sigma - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta_w)} \quad (28)$$

[Immature debris flow occurs; $0.03 < \tan \theta_w \leq 0.138$]

$$C_\infty = 6.7 \left\{ \frac{\tan \theta_w}{(\sigma - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta_w)} \right\}^2 \quad (29)$$

[Turbulent water flow with bed load transport occurs; $0.03 < \tan \theta_w \leq 0.138$]

$$C_\infty = \frac{(1 + 5 \tan \theta_w) \tan \theta_w}{\sigma - \rho_m} \left(1 - \alpha_0^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \alpha_0^2 \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \quad (30)$$

$$\alpha_0^2 = \frac{2\{0.425 - (\sigma/\rho_t) \tan \theta_w / (\sigma/\rho_t - 1)\}}{1 - (\sigma/\rho_t) \tan \theta_w / (\sigma/\rho_t - 1)} \quad (31)$$

$$\tau_{*c} = 0.04 \times 10^{1.72 \tan \theta_w} \quad (32)$$

여기서, ϕ 는 내부마찰각, τ_{*c} 는 무차원 임계전단응력, τ_* 는 무차원 전단응력 그리고 θ_w 는 수면구배를 나타며, Takahashi (1991)는 토사농도에 따라 자갈형 토석류($C_L > 0.4C_*$), 소류형 토석류($0.1 \leq C_L \leq 0.4C_*$) 그리고 난류형 토석류($0.1 < C_L$)로 구분 하였다.

3.2 검토대상지역

일본 후쿠이현(Hufui Prefecture) 동쪽에 위치한 오노시(大野市)는 면적 872.30 km², 산간(표고: 170~1,200 m) 분지형태의 지세가 형성되어 있으며 도심지 지역은 단구 및 저지대로 구별된다(Fig. 4). 연평균 강우량은 약 2,340 mm, 평균 약 200 mm의 월강우량을 기록(1981~2010, 30년), 동절기(12~2월)에는 평균 64cm의 적설량을 기록되고 있으며, 최근 게릴라성 집중강우로 인해 홍수범람과 토사재해가 집중 발생하였다. 특히 이 지역은 춘분시기에 강우가 발생하지 않아도 쌓여있던 눈이 녹으면서 표면수가 발

생해 토석류로 발달되어 재산 및 인명피해가 가중되고 있다. 일본 후쿠이현에서 토사재해 방지법에 따라 2004년 12월부터 2011년 10월까지 약 11,660개소의 토사재해 경계구역을 지정하여 토석류 피해경감을 위해 상시 관리하고 있다. 도심지 지역은 표고가 낮아 와지(凹地)지형에 빗물이 저류 및 배수불량에 따른 내수범람, 하천수위상승에 따른 외수범람이 빈번히 발생해 문제가 제기되고 있다. 따라서 재해경감을 위해 오노시에서는 2007년에 홍수 해저드 맵을 작성하였지만 현재의 강우패턴, 토사재해의 위험성과 홍수재해의 위험성이 중첩되는 지역에 대한 상호간의 범람 특징을 고려한 통합적인 해저드 맵 작성 및 구체적인 방재대책의 필요성이 강조되고 있다. 특히, 오노시는 평균연령 47.1세(총인구: 33,584명) 고령화 도시로서 피난계획수립 시 고려되어야 할 사항이라 판단된다.

3.3 계산조건설정

오노시에서 토사재해 경계구역 중, 토석류 및 도시홍수로 인해 피해 리스크가 큰 지역과 피난 시 피난경로가 유실

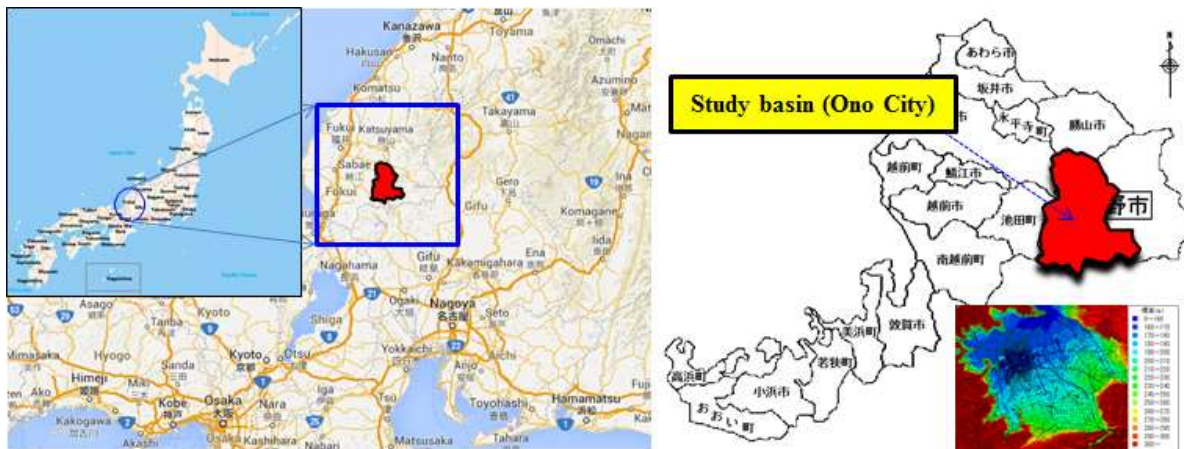
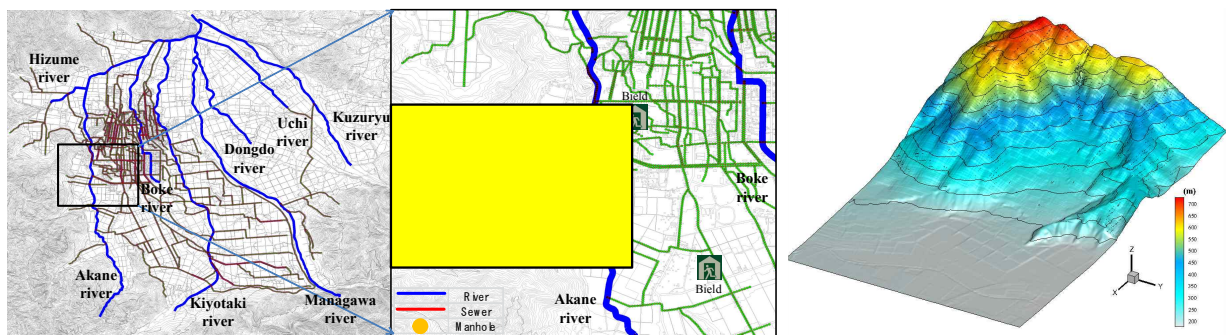


Fig. 4. Location of Study Basin



(a) Major facility of basin with sewer system

(b) Elevation of basin in simulation

Fig. 5. Numerical Calculation of Domain

될 가능성 큰 지역을 검토대상지역으로 선정하였다(Fig. 5). 본 연구에서는 DAD 해석에 따른 이 지역에서 발생 최대강우량에 따른 토석류 피크유량을 산정하여 3가지 토석류 발생지점 시나리오에 따른 토석류 영향범위 파악을 목적으로 시나리오에 따른 토석류 계산조건에 대한 상세한 사항을 Table 2 및 수치 시뮬레이션에 사용된 변수를 Table 3에 나타내었다. 토석류 발생지점 주변 환경은 표고 170~730 m, 집합소(정부로부터 피난 권고 발령 시 거동이 불편한 주민 및 대피요원의 도움이 필요한 주민이 모이는 곳 collecting point)까지의 유로경사는 약 17.45°, 피난소(Bield)는 Akane하천 인근에 위치하고 있으며 특히 대피 시, 피난경로가 하천을 통과해야 하므로 방재대책의 중요성이 강조되는 지역이다.

4. 해석결과

4.1 토석류 토사량

본 연구에서는 DAD 해석으로 부터 가능최대강수량에 따른 토석류 피크유량(Eq. 3)을 산출하여 검토대상지역에서의 유출가능 토사량(Pv)은 약 251,671m³로 조사되었다. 시나리오(Table 2)에 따른 토석류 피크유량(Q_p) 공급시간에 따른 토석류 발생 토사량은 Table 4와 Fig. 6에 나타내었다. 유량공급 시간이 증가할수록 발생 토사량의 체적은 선형적으로 증가하였으며, 본 연구에서는 시나리오에 따른 토석류 영향평가를 목적으로 유량공급 시간의 결정은 검토대상지역에서 발생가능유출 토사량(Pv)과 시뮬레이션 결과를 비교하여 각각의 시나리오 따른 유량공급 시

Table 2. Test Conditions used in this Study

No.	Occurrence point	Supply time (s)
Case1	A	10, 20, 30, 40, 60
Case2	B	10, 20, 30, 40, 60
Case3	A & B	10, 20, 30, 40, 60
Case4	A & B	A: 32, B:35

Table 3. Parameters for the Numerical Simulation

Parameter	Unit	Value
Basin area	km ²	1.262
Calculate time	sec	1,000
Input discharge (Q _{sp})	m ³ /s	167.665
$\Delta x, \Delta y$	m	5
ΔT	s	0.01
D ₅₀ (mean diameter)	m	0.1
tan ϕ (internal friction angle of the sediment)	—	0.7
C* (Maximum sediment concentration)	—	0.65
C ₃ (limitative sediment concentration)	—	0.48

Table. 4 Results of Occurrence Sediment Volume

Scenario	Occurrence point	Supply time (s)	Total Volume at final stage (m ³)
Case1	A	33	251,982 (▲ 0.145%)
Case2	B	38	250,528 (▼ 0.433%)
Case3	A&B	A:20, B:20	249,911 (▼ 0.678%)
Case4	A&B	A:33, B:38	483,269 (▲ 92.065%)

▲: Increase in total volume from prediction volume

▼: Decrease in total volume from prediction volume

간을 결정하였다. 그 결과 Case 1 (Point-A)에서는 약 33s (오차: +0.145%), Case 2 (Point-B)에서는 약 38s (오차: -0.433%) 그리고 Case 3 (Point-A&B)에서는 약 20s (오차: -0.678%) 동안 유량을 공급하였을 때 발생가능토사량과 가장 근사하게 재현 되었다. 또한, 최악의 시나리오를 가정한 Case4는 발생지점 A (Case 1)와 B (Case 2) 지역에서 각각 결정된 유량 공급시간을 적용(A지점 33 sec, B 지점 38 sec)하여 영향평가를 실시 결과 약 92% 토사량이 증가하였다.

4.2 도달속도

토석류는 일반 유체(clear water)보다 이동 속도가 굉장히 빠른 흐름 성질을 갖고 있으며 토석류 발생을 인지

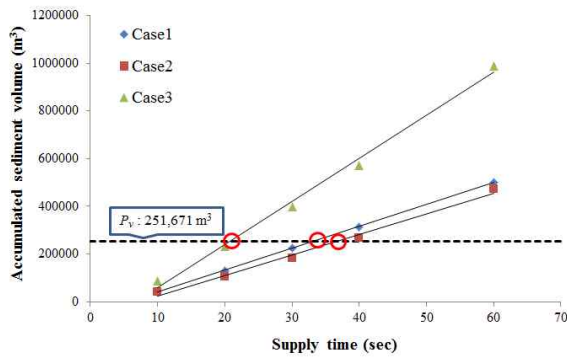


Fig. 6. Results of Total Volume

한 이후로부터 피난 행동은 시간적 여유가 비교적 없기 때문에 사전에 대처하는 행동이 매우 중요하다. 따라서 토석류가 발생 시점으로부터 토석류의 흐름이 직접 피해 지역까지 도달시간은 대책수립 시 중요한 자료로 판단된다. 토석류가 각각의 발생 지점으로부터 발생되어 피난소 (collecting point)까지의 도달시간 및 범람형태(Fig. 7)에 나타내었다. 발생지점에 따른 토석류 도달 시간은 발생지점 B (290 sec)가 발생지점 A (300 sec)보다 약 10 sec 정도 더 빠르게 도달하였다. 또한 2지점에서 동시에 발생된 Case 3 (260 sec)의 경우는 약 30 sec 정도 더 빠르게 도달 하였지만 범람형태 및 토석류의 퇴적 높이는 Case 1~3 모두 비슷한 흐름 경향을 나타내었다. 하지만 최악의 시나리오인 Case 4의 경우는 도달시간(150 sec)이 절반정도 감소하였으며 직접피해지역에서의 토석류 영향범위 또한 증가하였다. 이 결과로부터 토석류의 흐름 특성인 전파 속도가 매우 빠르게 나타났으며 토석류 발생을 인지한 이후로부터 피난행동 가능시간은 약 3~5분정도이며 특히 오노시의 평균 연령(47.1세)을 고려할 때 더욱더 피난행동에 대한 어려움과 향후 피난계획 수립 시 중요한 자료로 판단된다.

4.3 영향 범위

Fig. 8에 시나리오에 따른 토석류가 완전히 정지한 상태의 범람형태 및 퇴적 분포도를 나타내었다. 토석류의

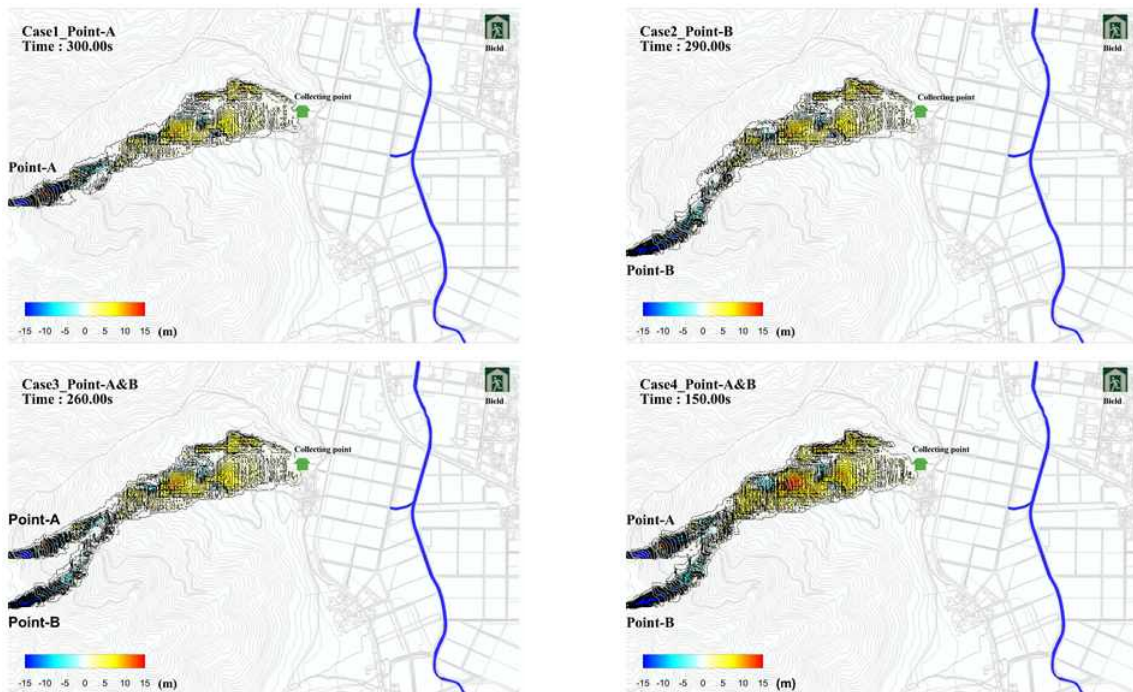


Fig. 7. Result of the Debris Flow Movement (arrived at the collecting point)

흐름 특성상 하상경사에 지배적인 영향을 받아 흐름형태가 재현되었으며 토석류 발생규모에 따라 그 영향범위도 다양하게 나타났다. Fig. 9(a)는 일반적인 토석류의 이동 형태를 하상경사에 따른 분류(Osanai et al., 2010)이며 이를 바탕으로 검토대상지역의 주요 위치를 기점으로 Fig. 9(b)와 같이 분류하였다.

본 연구에서는 피난 행동 계획 시, 중요한 자료로 활용

될 수 있는 주요 피난 이동 경로(집합소부터 인근 대피소까지)를 바탕으로 범람 형태를 파악하였다. 지리적 특징은 집합소(collecting point)로부터 X 방향으로 하천이 위치한 지역까지의 거리는 약 600 m (1.02°)로 굉장히 완만한 구배로 형성(depositional area)되어 있으며 주로 논, 밭 그리고 도로 등으로 구성되어 있다(Fig. 10(a)). Fig. 10(b)는 토석류 흐름이 완전히 정지된 상태의 퇴적범위로

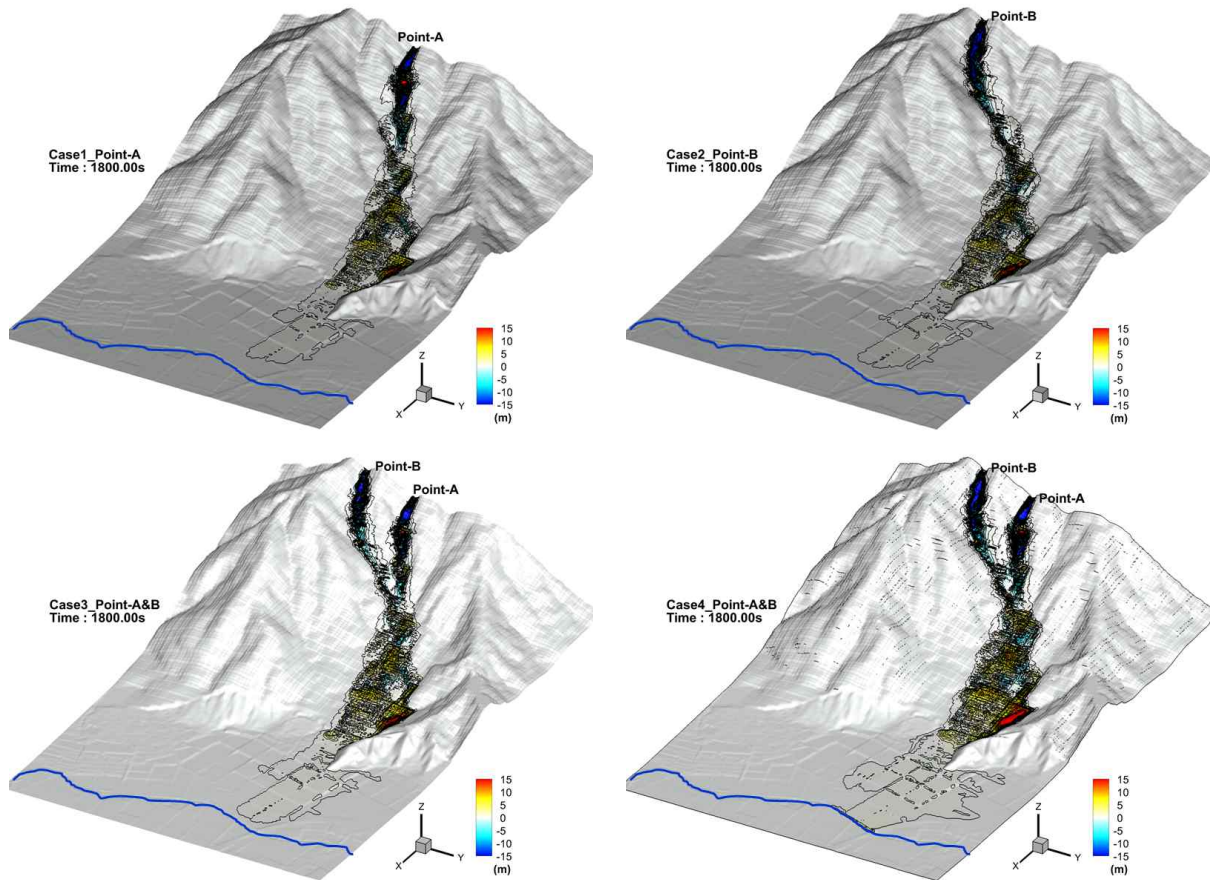
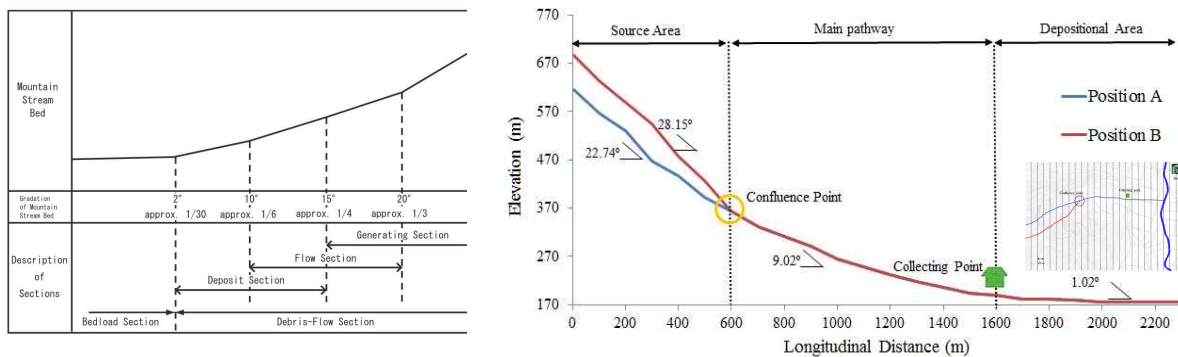


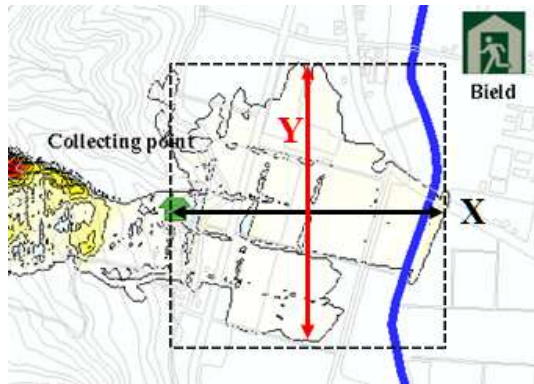
Fig. 8. Numerical Results of the Movement of a Debris Flow (at the final stage)



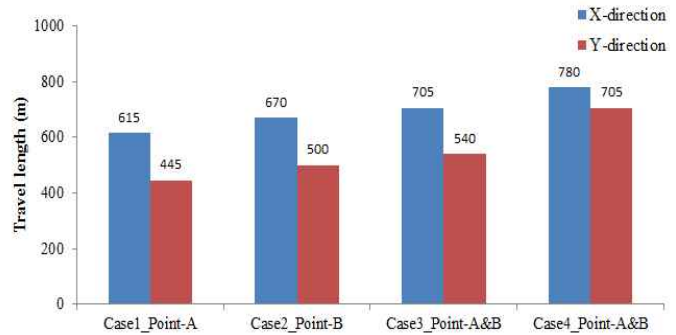
(a) Rough standard

(b) Elevation of study basin

Fig. 9. Gradation of Mountain Stream Bed in Sediment Displacement Morphology



(a) Definition of range (X and Y)



(b) Compare to ranges of deposit formation

Fig. 10. Numerical Results of the Deposit Formation at the Fan Area

서, 토석류의 규모에 따라 그 영향범위를 나타내었다. 발생지점에 따라서는 Case 1_Point-A와 Case 2_Point-B는 거의 비슷한 범람 분포를 나타내었지만 Case 3_Point-A&B에 대해서는 비록 유출 토사량은 비슷하지만 그 범람 범위가 증가했음을 확인하였다. 또한 Case4_Point-A&B의 경우 유량공급 시간의 증가에 따라 x 방향 퇴적 범위는 27%, y 방향으로 58%가 증가였으며 이 경우는 인근 하천까지 토석류 토사가 퇴적되어 하천의 통수능을 감소시켜 2차 피해인 외수범람의 위험성을 확인할 수 있었다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 피난 계획 수립 시, 토석류 범람에 따른 피난 계획 대안 작성을 목표로 계획 토석류에 따른 그 영향 범위를 검토하였다. 평면 2차원 토석류 모델을 기반으로 시간에 따른 범람 형태 및 토사 유출량을 파악, 피난 대피 시 주요 이동경로 지역을 대상으로 그 영향범위를 검토하였으며, 본 연구에서 검토한 주요내용 및 향후 검토방안에 대해 기술하면 아래와 같다.

- 1) 토석류의 밀도는 토석류의 흐름 재현에 있어 매우 중요한 인자 중 하나로서 Takahashi (1991)의 제안식을 바탕으로 토석류의 밀도를 고려한 토석류의 흐름 해석할 수 있는 평면 2차원 모델을 구축하여 실제지형에 적용하였다.
- 2) 외력산정으로 DAD 해석을 통한 최대강수량을 산정하였으며 이에 따른 합성합리식을 적용하여 검토대상지역의 유출량 계산을 실시하였다.
- 3) 정량적인 방법을 통해 토석류의 퇴적 분포를 파악하였으며 그 결과 토석류 발생위치에 대한 영향보다 토석류의 규모(유량공급시간)에 따른 영향이 크게

나타났으며, 최악의 시나리오를 가정한 두 지점에서 동시에 발생할 경우 더 많은 피해가 예상되며 이에 대한 충분한 검토가 필요하다고 판단된다.

- 4) 토석류 흐름 특성상 그 이동속도가 다른 유체에 비해 빠르게 전파하며, 토석류가 주거지역(직접피해 예상지역)까지 도달시간은 약 3~5분 내외로 토석류 발생 이후의 피난 경보는 사실상 무의미하며 토석류 발생 예상 경우 내습 시, 사전에 피난권고를 실시해 그 피해를 감소시키는 계획이 중요하다고 판단된다.
- 5) 토석류 범람으로 인해 피난권고 시, 주요 대피 경로인 도로까지 그 영향범위가 나타났으며 특히 Case4_Point-A&B의 경우 토석류의 토사가 인근하천까지 이동해 하천의 통수능을 감소시켜 외수범람의 2차 피해에 대한 검토 또한 필요한 것으로 판단된다.

향후 연구로서, 본 연구에서 구축한 토석류 수치모델의 결과를 바탕으로 향후 DAD 해석에 따른 빈도별 강수량을 산정 후 동일 강우 사상에 대한 홍수범람모델(내·외수 범람모델)을 구축, 토석류 및 홍수범람에 따른 각각의 재해 특징을 파악 및 상호간의 특징을 고려한 통합적인 대책 수립에 관한 연구 및 구축한 모델의 현장 적용성 평가를 위해 더욱 많은 검증과 보완, 특히 수리모형실험의 검증뿐만 아니라 이 지역에 발생된 기존의 토석류 범람에 대한 시뮬레이션 재현을 통해 모델의 활용도를 높이는 연구를 진행할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2013년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥회의 지원(연안침식대응기술개발, 과제번호:

2013023)을 받아 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Aasida, A., and Takahashi, T. (1980). "Study on debris flow control, hydraulic function of grid type open dam." *Annals of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, No. 23 B-2, pp. 443-441. (in Japanese with English Synopsis)
- Bagnold, R.A. (1954). "Experiments on a gravity free dispersion of large solid spheres in a newtonian fluid under shear." *Pro. Roy. Soc. A*, 225, pp. 49-63.
- Egashira, S., Miyamoto, K., and Itoh, T. (1997). "Constitutive equations of debris flow and their applicability." Proceedings of the 1st Conference of Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, pp. 340-349.
- Kim, N.W., and Won, Y.S. (2004). "DAD analysis on storm movement." *Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 37, No. 5, pp. 437-448.
- Kim, Y., Nakagawa, H., Kawaike, K., and Zhang, H. (2012). "Numerical analysis of debris flow deposition on breaker structure." *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol. 68, No. 4, pp. 1-6.
- Kim, Y., Nakagawa, H., Kawaike, K., and Zhang, H. (2013). "Study on the function of a closed-type sabo dam with a flap for debris flow." *Advances in River Research-Fukuka et al. (eds)©2013 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00062-9, 12th International Symposium River Sedimentation*, pp. 1945-1954.
- Nakagawa, H., Takahashi, T., Satofuka Y., and Kawaike, K. (2003). "Numerical simulation of sediment disaster caused by heavy rainfall in Camuri Grande basin, Venezuela 1999." Proceedings of the Third conference of Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Switzerland, Rotterdam, pp. 671-682.
- Nakagawa, H., Takahashi, T., Sawada, T., and Satofuka Y. (1996). "Design hydrograph and evacuation planning for debris flow." *Annals of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, No. 39 B-2, pp. 347-371. (in Japanese with English Synopsis)
- NILIM. (2007). "Manual of technical standard for establishing sabo master plan for debris flow and driftwood." Technical note of national institute for land infrastructure management No. 364.
- Okuda, S., Suwa, H., Okuunishi, K., Nakano, M., and Yokoyama, K. (1977). "Synthetic observation on debris flow, Part 3. Observation at valley Kamikamihorizawa of Mt. Yakedake in 1976." *Annals of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, No. 21 B-1, pp. 277-296. (in Japanese with English Synopsis)
- Osana, N., Mizuno, H., and Mizuyama, T. (2010). "Design standard of control structures against debris flow in Japan." *Journal of Disaster Research*, Vol. 5, No. 3, pp. 307-314.
- Qian, C., Sasada, T., and Yamada, T. (2012) "Theoretical derivation of synthesized rational formula and runoff analysis using high-resolution rainfall data." Proceedings of the 10th Intl. Conf. on Hydroscience & Engineering. Orlando, Florida, U.S.A., pp. 1-10.
- Takahashi, T. (1977). "A mechanism of occurrence of mud-debris flows and their characteristics in motion." *Annals of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, No. 20 B-2, pp. 405-435. (in Japanese with English Synopsis)
- Takahashi, T. (1991). "Debris flow." Monograph series of IAHR, Balkema, pp. 1-165.
- Takahashi, T., Nakagawa, H., Harada, T., and Yamashiki, Y. (1992). "Routing debris flows with particle segregation." *Journal of hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 11, pp. 1490-1507.

paper number : 14-107

Received : 31 October 2014

Revised : 13 January 2015

Accepted : 13 January 2015