

집중 강우에 따른 토석류 유출의 수치계산

김 정 한* · 민 선 홍** · 강 상 혁***

Study on the Numerical Simulation of Debris Flow due to Heavy Rainfall

Jung-Han Kim* · Sun-Hong Min** · Sang-Hyeok Kang***

요 약

토석류에 대한 많은 수치 해석적 연구에도 불구하고 아직 일관된 연구 결과는 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 강우 유출 모형을 적용하기 위해 소유역별 대상유역을 분할하고 토석류 입자와 유체를 일체화한 토석류 유출량을 산정하고자 하였다. 등고선 데이터를 이용하여 소유역 하도망과 같은 유역의 지형량을 자동적으로 도출하였으며, 준 수치고도모델(Quasi Digital Elevation Model)을 모형화함으로써 강우 유출량을 해석하였다. 계측된 토석류 자료와 강우자료를 입력하여 토석류 모형을 통합화하였으며 이를 적용한 결과 대체로 토석류 유출과 유사한 하이드로 그래프를 얻을 수 있었으며 유의한 점으로써 토석류는 30초 이내에 유출되므로 피해를 최소화하기 위해서는 사전적 대응이 중요함을 시사한다. GIS와 연계한 본 모형은 향후 토석류 유출에 따른 유역별 하천계획의 수립시 유효한 자료를 제공할 것으로 기대한다.

주요어 : 하천관리, ArcView GIS, 준 분포형 모형, 유출특성, 토석류

ABSTRACT : In spite of many numerical analysis of debris flow, a little information has been found out. In this paper the watershed is divided to apply rainfall runoff and to estimate debris flow integrating flow and soil article. We use the contour data to extract spatially distributed topographical information like stream channels and networks of sub-basins. A Quasi Digital Elevation Model (Q-DEM) is developed, integrated, and adopted to estimate runoff based on marked one. As a results, it has been found out that the debris flow was close to observed flow hydrograph. Because debris flow is finished in 30 second, it is important that we have to prepare its prior countermeasure to minimize the damage of debris flow. The GIS-linked model will provide effective information to plan river works for debris flow.

Keywords : River planning, ArcView GIS, Basin model, Runoff characteristics, Debris flow

1. 서 론

최근 빈번한 강우 및 집중호우에 따라 산복 사면이 붕괴함으로써 야기되는 토석류에 의해 개인의 재산 및 인적 피해가 사회적 문제가 되고 있다. 그러나 토석류에 대해서는 현재까지 그 발생 과정이 명확하게 규명되어 있지 않아 연구자 간에 공통된 견해가 얻어져 있지 않다. 토석류의 유동, 퇴적에 관한 연구에 대해서는 주로 연속체의 보존법칙을 이용하여 토석류를 취급하는 것이 대

부분이며 구성법칙을 이용함으로써 토석류의 흐름을 풀어 나가는 것이 일반적이다(Itoh 와 Miyamoto, 2002).

구성법칙에 대해서는 각 연구자가 흐름에 대해 역학적인 해석이 달라 통일된 견해가 없으므로 각각의 연구 성과를 토대로 토석류의 규모, 유동 및 퇴적의 과정이 어느 정도 예측할 수 있는 단계에 있다(Ashida, 1987). 토석류는 계류 하상에 퇴적하는 모래자갈에 침식하여 이들을 흐름으로 혼입시킴으로써 그 규모가 크게 된다. 발달한 토석류가 환경사 단면으로 유동하게 되면 토석류의 농도는 작게 되어 토사를 운반하는 것이 어렵게

*강원대학교 방재전문대학원, 박사과정수료

**강원대학교 방재전문대학원, 교수

***교신저자, 강원대학교 환경방재공학과, 겸임교수(kang7231@hanmail.net)

되어 토사를 퇴적시키게 된다. 이로써 토석류는 흐름의 규모가 작게 되어 정지상태에 이르게 된다. 이와 같은 토석류는 크게 두 가지로 취급할 수 있다. 하나는 침식 속도에 관한 구성법칙을 구축하여 흐름의 연속식이 부유토사에 용출항으로 구성하는 방법이다. 이 경우 침식 속도는 평형농도와 입자 농도와와 차 또는 평형구배와 하상구배와의 차에 비례하는 구성법칙이 도출되어 있다. 다른 방법은 흐름의 입자농도를 평형상태로 취급하는 방법이다. 이는 흐름의 국소적인 임의 시간에 있어 입자농도가 평형상태에 도달하는 것으로 가정하여 계산하는 방법이다. 이는 앞의 침식속도에 관한 구성법칙을 도입하는 것과는 다르게 토석류에 의한 침식속도를 간접적으로 평가하는 방법이다(Egashira et al., 1991). 결국 토석류의 흐름을 정리하면 1차원적인 모형으로 취급할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 침식, 퇴적이 반복되는 토석류의 흐름에 있어서는 입자 유동층의 위치가 자유수면보다 높게 되는 경우도 있으므로 모래자갈상과 유체상을 구별하여 계산할 필요가 있다. 이와 같은 현상을 고려하여 본 연구에서는 일원화한 모형의 지배 방정식을 적용하여 토석류의 침식, 퇴적에 관한 1차원 수치계산을 행하여 얻은 결과에 기초하여 토석류의 유동에 관한 검토를 하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구진행 과정

본 연구를 진행하기 위한 전체적인 흐름은 [그림 1]

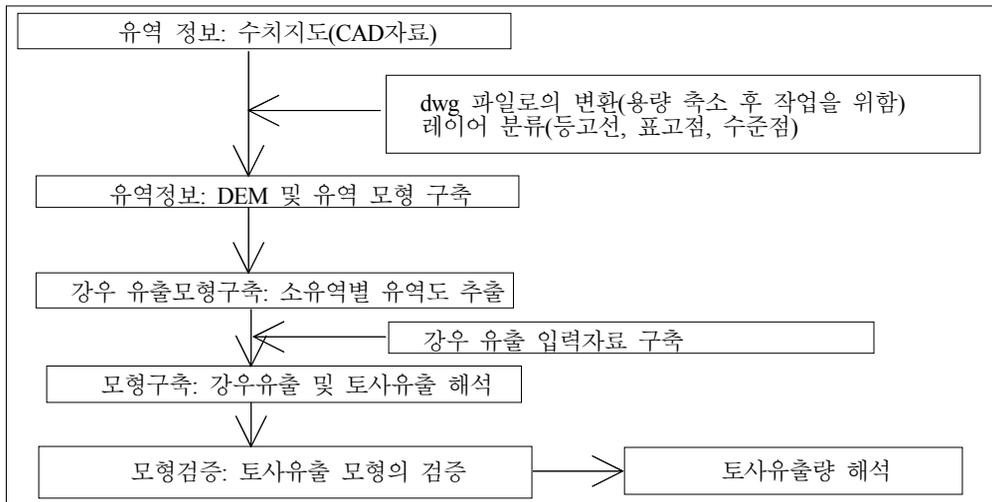
에 나타난 바와 같이 크게 수치지도로부터 유역 정보를 취득하는 과정과 이를 토대로 유역 유출모형에 의한 강우량의 산정, 그리고 강우량과 토석류 등의 경계조건으로 한 1차원 토석류 흐름 해석으로 나눌 수 있다.

유역정보로서는 각 소유역으로 분할된 유역에 대해 강우 유출 모형인 kimenatic wave법의 입력자료인 유역 면적, 하천길이 및 유역경사를 ArcView GIS를 이용하여 추출하였고 이를 토대로 유량과 토석류 해석 모형을 구축하였다.

2.2 대상유역 현황

연구 대상지인 가리산 유역의 가리산천은 한강의 제 3지류로 지방1급 하천인 소양강에 합류되는 유역면적 86.73km², 유로연장 16.70km인 지방 하천이다. 가리산천은 주로 산지로 형성되어 있고 부분적으로 하천변 경사지에 농경지 및 부락이 산재해 있으며 농경지의 폭은 좁고 하상경사가 급한 전형적인 산지하천의 특징을 가진다.

2006년 7월 15일 인제군 가리산 일대 대규모 토석류 발생 전일 강우는 [그림 2]와 같이 7월 12일 171mm, 13일 12mm, 14일 74mm였으며 피해 당일의 일강우는 178mm를 기록하였다. 또한 피해가 발생한 7월 15일 10-11시 경의 시간 최대 강우는 48mm, 3시간 최대 강우량은 110mm를 기록하였다. 전일 강우는 토양이 포화상태에 도달하게 하며 지속적인 강우에 의한 초과 강우 및 시간최대 강우강도의 규모는 연이어 표면류 및 측방 유입량을 순간적으로 증가시킴으로써 사면의 저지대에 산사태 또는 지반함몰과 같은 지반 붕괴를 초래하여 궁



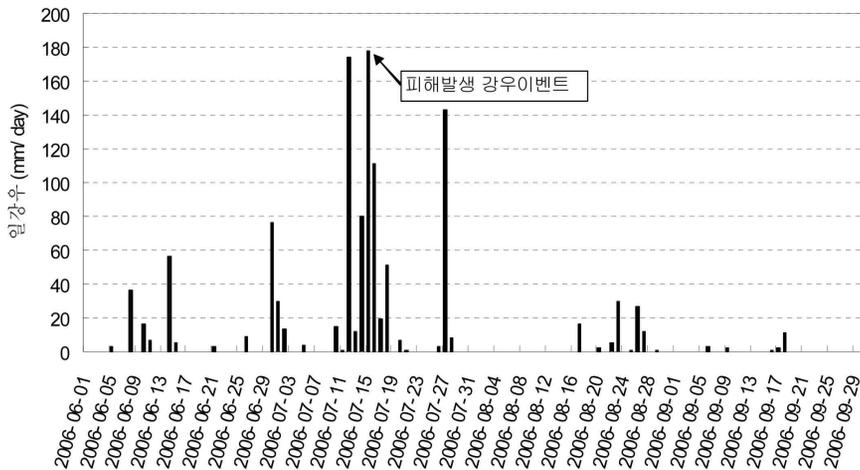
[그림 1] 지형자료 분석 및 토사유출 모형의 구축

극적으로 대량의 토석류를 발생시킨다. [그림 3]은 토석류가 발생하지 않은 2005년의 강우 분포를 나타낸 것으로 부분적으로 집중호우는 기록되었으나 일 강우량이 50mm를 초과한 경우가 산포됨으로써 상대적으로 토석류가 발생할 가능성을 낮추게 된 요인으로 보인다(강상혁, 2008).

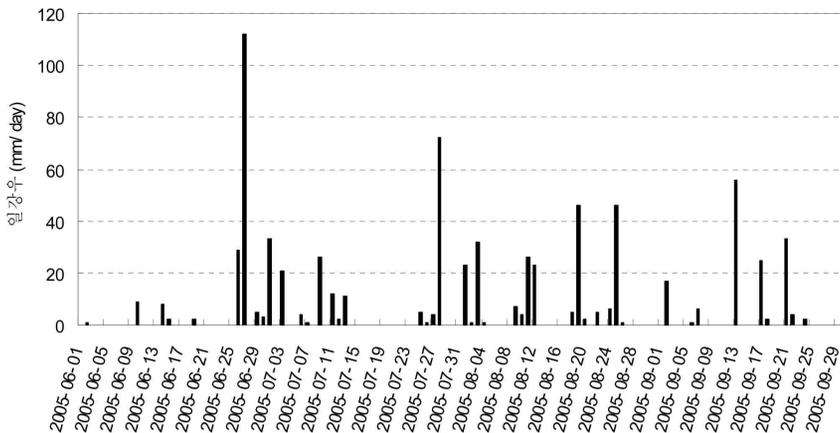
강원도 재난대책안전본부의 통계에 의하면 집중호우가 발생한 2006년 7월 14일부터 18일 동안 인제지역의 인명피해는 총 30명으로 이재민은 총 293세대에 714명이 발생한 것으로 조사되었다. 가옥피해는 전파 161, 반파 90 그리고 침수피해는 155가구인 것으로 나타났으며 대부분의 인명피해는 가리산 일대에서 발생한 것으로 조사되었다.

2.3 유역정보의 추출

수문 유출모형은 유역의 표고, 경사 및 하천길이 등 유출에 직접적으로 영향을 미치는 요소의 반영여부에 따라 집중형 모형(Lumped model)과 격자형(Grid) 또는 분포형 모형(Distributed model)로 구분할 수 있다(강상혁, 2007; 김성준, 2002;2002). 최근 유출 모형의 경향을 보면 모형적용의 편리성으로 인하여 분포형 유출모형 위주로 연구되어 왔다. 격자형 모형은 GIS(Geographic Information System)기술의 발달과 아울러 격자의 크기가 유출에 미치는 영향을 검증할 정도로 세밀하게 진행되었다. 그러나 실제 수문계획에 있어서는 집중형 모형을 유역 경계가 명확한 소유역별로 강우 유출량을 산정하는 것이 보다



[그림 2] 토석류 발생당시 집중강우(2006년 7월 11~7월 20)



[그림 3] 토석류가 발생하지 않은 분산형 집중호우(2005년 당시)

효과적이라 할 수 있다. 본 모형의 적용 지역인 가리산 유역은 지형의 형태학적 측면에서 보면 하천의 유로연장이 짧고 하상 경사가 크며 세류가 발달한 전형적인 산지 하천 형상을 보이고 있으므로 소유역의 분할 정도에 따라 강우 응답 특성이 현저할 것으로 예상되며 향후 사방공사와 같은 계류지역의 토석류 제어 계획에 있어서도 유효한 자료를 제공할 것으로 본다. 이러한 관점으로부터 본 연구의 강우 유출 모형은 집중형 모형에서 유역별 특징에 따라 소유역(Sub-basin)으로 분할한 유역 특성모형(Kinematic model)을 적용하였으며 모형 적용상 필요한 유역장은 다음과 같이 분할하였다.

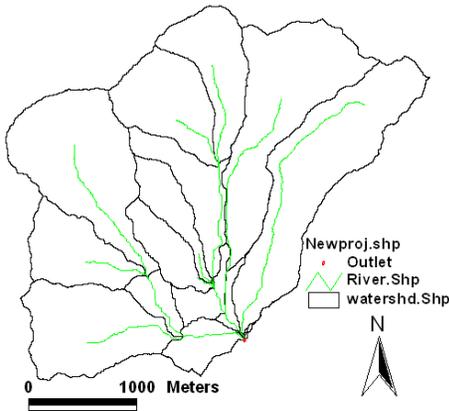
- 1) Kinematic model은 유역의 상류에서 하류의 유출 기준점까지 수로로 유입되는 유출량을 순차적으로 계산하므로 소유역 분할은 이에 준한다.
- 2) 분할된 소유역[그림 4]은 두 개의 소유역[그림 5]이 합하여 하나의 수로를 형성하는 경우는 서로

병합(Merge)하여 하나의 소유역이 되도록 하며 두 개의 수로가 하나의 수로로 합류되는 경우[그림 6]는 합류 전 두 개의 수로를 하나로 한다.

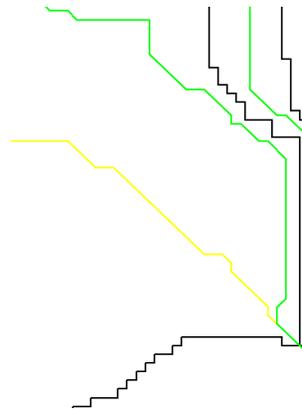
- 3) 집중화한 각 소유역은 최 하단부의 소유역[그림 7의 7번 소유역]에서 유출되도록 함으로써 유역전체 모형을 구축하며 구축된 모형의 입력 자료는 <표 1>과 같다.

2.4 강우유출량 산정

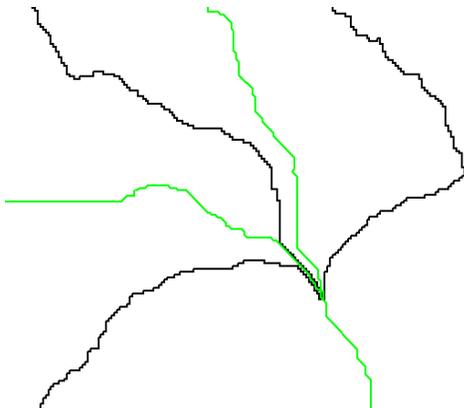
본 연구에서의 강우자료는 “국가수자원관리 종합시스템”의 2006년 7월 인제군 유역의 수문기상 자료를 이용하였고 유역 상류단 산간 유역의 강우에 따른 유출량을 평가하기 위하여 다음과 같은 특성 유출 곡선(kinematic wave)을 적용하였다.



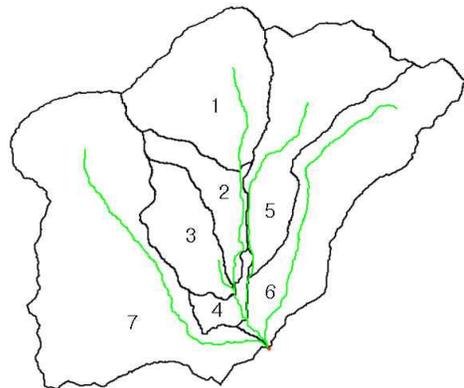
[그림 4] 소유역 및 수로의 통합 전



[그림 6] 두 개의 수로가 합류하여 하나의 수로를 형성하여 유하하는 경우



[그림 5] 두개의 소유역이 동시에 합류되어 유하하는 수로



[그림 7] 소유역 및 수로의 통합 후 유출 계산 순서

<표 1> 강우 유출모형의 입력자료

유역번호	면적(km ²)	경사	하천길이(m)
1	1.2	0.17	1075
2	0.4	0.22	1238
3	0.5	0.11	394
4	0.2	0.07	279
5	1.2	0.14	2326
6	1.5	0.2	2928
7	2.9	0.13	2305

<산지 사면류>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad (0 \leq x \leq L) \quad q = \alpha h^m$$

여기서 t : 시간, x : 사면 상류단으로부터의 거리, h : 수심, q : 사면 단위폭 당 유량, r_e : 유효강우, L : 사면 길이, α, m : 각각 흐름의 특성을 나타내는 사면 정수. 홍수유출 계산에서는 Manning의 저항법칙을 일반적으로 적용하며 이 경우 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{\sqrt{i}}{N}, \quad m = \frac{5}{3}$$

여기서, I : 사면 구배, N : 사면의 조도계수

<산지 하도류>

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (0 \leq x \leq L_c)$$

$$Q = GW^M$$

2.5 토사유출량 흐름모의

<하도 연속식>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = E$$

여기서, $M=uh$, u : 흐름의 단면 평균 유량, E : 미식 또는 퇴적 속도. 유동층 농도: C , 퇴적층 농도: C_* 로 하면,

<입자의 연속식>

$$\frac{\partial (Ch)}{\partial t} + \frac{\partial (CM)}{\partial x} = EC_*$$

<흐름의 운동식>

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} = gh \sin \theta_b - gh \cos \theta_b \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho_T}$$

여기서, g : 중력 가속도, θ_b : 하상의 경사 각도로 x 축의 수평 경사각: θ_0 , x 축에 대해 수직 상향을 취한 y 축으로부터 측정한 퇴적층의 깊이: z 로 하면,

$$\theta_b = \theta_0 + \tan^{-1} \frac{\partial z}{\partial x}$$

결국 하상위의 변화는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial z}{\partial t} + E = 0$$

3. 결 과

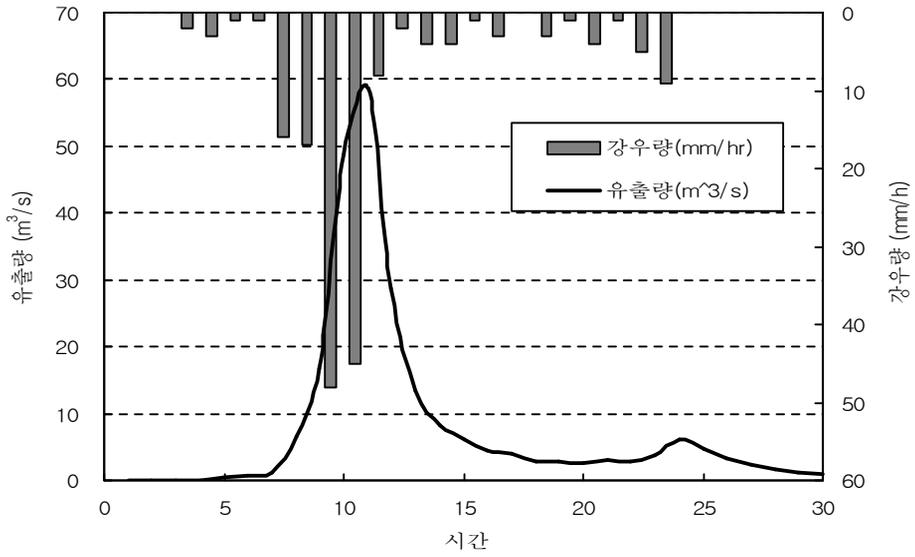
3.1 강우유출량 산정

Kinematic wave모형을 유역의 지형특징에 맞게 소유역별로 경계를 보정하여 2006년 7월 15일 발생한 강우 유출량 하이드로 그래프는 [그림 8]과 같다. 계산된 강우 유출량은 58m³/s로 이는 유출계수를 산지유역인 0.7로 가정했을 때의 합리식에 의한 유출량 73m³/s보다 높게 산정되었다. 합리식을 이용한 침투 유량은 일반적으로 높게 산정되는 경우가 많으므로 토석류 계산의 상류 경계치로는 이 두가지 방법의 평균값인 65m³/s로 하였다.

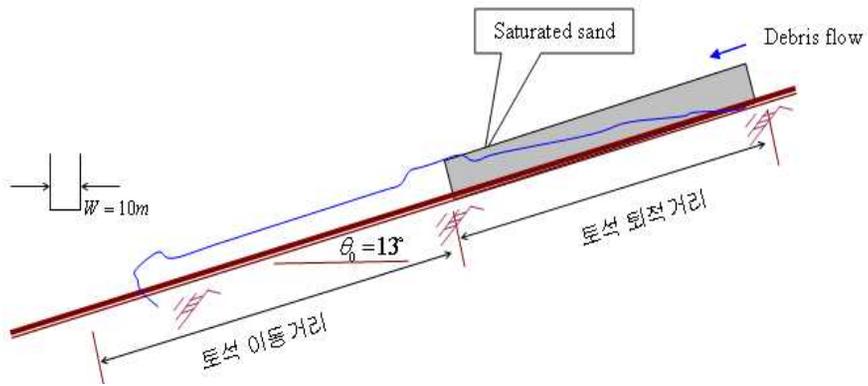
3.2 토사유출량 흐름 모의

특성유출 곡선(kinematic wave)으로부터 구한 침투 홍수유량을 [그림 9]와 같이 하도의 상류 경계단에 입력함으로써 토석류의 유량과 유동수심을 산정하기 위한 하이드로 그래프를 구하였다.

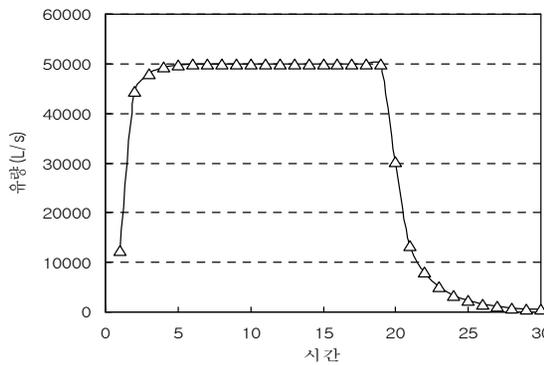
수치계산의 조건으로써 토석류의 평균 입경은 10mm로 가정하였고 상류 경계단의 입력 유량은 침투유량 중에서 30초간을 계산하기로 하였으며 그 결과는 [그림 10과 11]과 같다. 토석류 유동에 관한 기존의 모형실험 결과(Takahashi and Tsujimoto, 1984)와 비교해 보면, 토석류가 유하하여 정지하기까지의 소요시간은 개략 1-3



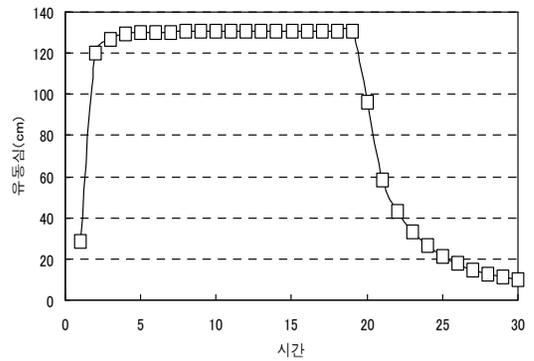
[그림 8] K-W법을 이용한 강우 유출량 계산결과



[그림 9] 토석류의 모형 개요



[그림 10] 토석류의 유출 유량



[그림 11] 토석류의 유동 수심

초 정도로 알려져 있으나 본 수치 모의실험에서는 20초 부터 급격히 줄어들어 25초에 이르러서는 토석류 유출 이 종료되는 것으로 계산되어 실험결과와 양호한 재현 성이 있는 것으로 나타났다. 토석류 유출은 이와 같이 순간적으로 발생하므로 피해를 줄이기 위한 대응을 어 렵게 하는 요인이 되기로 한다. 토석류 유출량에 대한 구체적인 조사결과가 없으므로 본 연구에서는 토석류 유출 후의 흔적 조사를 통하여 그 규모를 비교하였으며 토석류 유출의 주 영향인자에 대한 반복 계산결과, 입경 의 크기에는 큰 영향이 없었으며 주로 하폭과 유량에 큰 영향을 받는 것으로 조사되었다.

4. 결 론

강우에 따른 산복사면의 붕괴현상에 관한 정량적인 정보가 충분하지 않아 아직 현상학에 머무르고 있으나 본 연구에서는 토석류의 유출 과정을 유역 강우유출모 형과 토석류 유동 모형을 일원화하여 규명하고자 하였 다. 본 연구를 통하여 얻어진 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 토석류 흐름 해석을 위해 ArcView GIS를 이용한 준 분포형 모형을 유역 특성에 맞게 보완하여 강 우 유출량을 구하였으며 강우 유출량으로부터 토 석류 모형을 통합하여 토석류 유출에 대한 하이드 로 그래프를 구하였다.
- 2) 토석류의 유동, 퇴적과정은 1차원 모형을 구축하 여 적용한 결과, 토석류 유출은 강우 유출량과 유사한 재현성을 보였으며 토석류 유출의 주영향 인 자는 강우 유출량과 하폭인 것으로 나타나 향후 계류지역의 하도정비 시 이에 대한 자료 축적이 필요하다.
- 3) 토석류 발생은 발생기작에서 종료까지 보통 20-30 초밖에 소요되지 않으므로 이에 따른 피해를 줄이 기 위해서는 사전적 대응이 무엇보다 중요하다.
- 4) 토석류 유출에 대한 일관된 연구결과는 아직 성립 되어 있지 않아 불확실성이 다수 존재하지만 향후

누적 강우량, 강우 유출량, 유역 지형량 등의 자료 등이 축적되어 정량적이 분석이 이루어 진다면 토 석류에 따른 피해를 줄일 수 있는 구체적인 방안이 수립될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구의 일부는 강원대학교의 연구지원을 받아 수 행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

강상혁, 2007, 유역 상류지역의 개발이 유출에 미치는 영향, 한국GIS학회, 15(2), pp.147-158.
 강상혁, 2008, 집중호우에 따른 부유토사 유출특징 및 주민 대응, 한국GIS학회, 16(1), pp.11-17.
 김성준, 2002, 수자원관리에서 분포형 수문모델링의 역할, 한국수자원학회지, 35(2), pp.45-56.
 김성준, 2002, 분포형 수문모델의 구축, 보정 및 검증, 한국 수자원학회지, 35(4), pp.55-65.
 Egashira et al., 1991, Derivation of bed-load formula from a view point of contineous body, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 35, pp.441-446.
 Ashida K et al., 1987, Ocurrance of slope failure and mechanics of debris flow Annuals Disaster Prevence Research Institute, No 30(B-2), pp.507-526.
 Itoh T., and Miyamoto K., 2002, Study on one dimensional numerical simulation of debris flow, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 46, pp.671-676.
 Takahashi T and Tsujimoto H. 1984, Numerical simulation of flooding and deposition of a debris flow, Annuals Disaster Prevence Research Institute, No 27(B-2), pp.467-485.

접수일 (2009년 10월 30일)
 최종수정일 (2009년 11월 27일)
 게재확정일 (2009년 11월 27일)