

## 저감시설의 설치 유무에 따른 토석류 유출량 해석\*

진계원, 전병희, 장창덕\*\*

강한 호우로 인한 토사재해 중 토석류 재해는 발생시기와 위치의 예측이 어려워 이를 예방할 수 있는 저감시설의 도입에 대한 연구가 필요한 분야이다. 2006년 강원도에 발생한 대규모 산사태 및 토석류 재해와 2011년 7월 서울 서초구 우면산 일원 및 춘천시 천전리 일대의 토석류 재해 발생은 이러한 점을 잘 나타내는 사건이라 할 수 있다. 본 연구에서는 실제 토석류 발생 실험을 수행한 연구지역을 대상으로 저감시설물(사방댐)의 설치 유무에 따른 토석류 발생량을 예측하여 토석류 저감시설의 저감효과를 분석해보았다. 토석류 발생량 예측에는 침식과 퇴적의 모의가 가능한 1차원 수치해석모형을 이용하였다. 토석류 유하구간을 상류부, 하류부 및 유출부로 나누어 토석류 발생량을 분석한 결과 저감시설을 설치 시 발생하는 토석류 체적을 미 설치 시에 비해 약 27% 감소시키는 저감효과를 나타내는 것으로 분석되었다.

**주제어:** 토석류, 산지재해, 토석류 저감시설, 사방댐, 수치해석

### 1. 서론

한반도의 강우특성은 기후변화에 따른 영향으로 여름철에 강우가 집중되며 강우기간은 짧고 그 강도는 점차 강해지는 추이를 나타내고 있다. 이는 전반적인 강우량이 조금 증가한 것에 비해 특정지역에 강우가 집중되는 집중호우 형태의 강우현상이 빈번히 발생하는 것으로 분석되고 있다. 특히 산지가 많은 국내에서는 집중호우로 인해 유발되는 산지 유출에 의해 토사재해의 발생이 늘어나고 있는 추세이다. 특히, 2011년 7월 서울 서초구 우면산 일원 및 춘천시 천전리 일원의 토석류 재해 발생은 여름철 자연재해의 새로운 피해 형태를 국민에게 인식시켰다. 토석류재해는 붕괴된 토사가 물과 함께 섞여 높은 농도로 하류를 향해 흐르는 토사재해의 일종이다. 이러한 토석류의 흐름은 하류로 이동하며 하천바닥과 측벽의 재료를 침식시켜 규모가 커지게 되어 발생원의 규모로 예측하기 힘든 큰 피해를 발생시키는 특징을 보인다. 하지만 토석류는 재해의 징조를 파악하기 어렵고 발생 시 피해지역에

\* 본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비지원(과제번호#08지역기술혁신 B01-01)으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

\*\* 교신저자.

서 벗어나기 위한 시간이 짧아 피해저감을 위한 다양한 방법이 강구되어야 한다. 토석류 현상에 대해 Iverson(1997)이 풍화된 흙과 암석이 폭우나 장마로 인해 흘러내리는 현상에 대해 정의하고 연구를 시작한 이후 많은 연구자들이 토석류 연구를 수행하였다. 수치모형을 이용하여 토석류 현상을 해석하기 위해 수행한 초기연구는 19세기 중반 Bagnold(1954)가 Dilatant 모형을 제안하여 산지하천에 적용한 연구가 있으며 Savage & Sayed(1984)는 Newtonian 모형을 발전시켜 토석류 해석의 이론을 정립하였다. O'Brien, *et. al.*,(1993)은 2차원 흐름경로 모형을 개발하여 토석류의 해석이 가능하게 하였고 Calligaris, *et. al.*,(2008)은 이탈리아 알프스지역에 상용프로그램인 FLO-2D를 이용하여 토석류의 흐름을 파악하여 토석류 피해의 저감을 위해 활용하였다. 국내에서는 주로 재해지역에 대한 조사와 통계적인 방법의 연구가 진행되었지만 최근 토석류에 대한 관심이 커지며 보다 다양한 방향의 연구가 활발히 수행되고 있다. Jun, *et. al.*,(2010)은 FLO-2D를 이용하여 제천지역에 발생한 토석류를 분석하여 발생량을 분석한 적 있다. 전병희 외(2011)는 Kanako-2D 모형을 활용하여 토석류피해지역을 분석하기 위한 방법론적으로 접근한 적 있는 등 국내에서도 토석류를 해석할 수 있는 수치모형을 이용한 다양한 연구가 시도되고 있다.

본 연구에서는 강원도 평창의 토석류 실험실험지역의 현장 조사자료를 이용하여 수치모의를 수행하였다. 토석류 발생위험지역에 대한 저감대책으로 시설물(사방댐) 설치방법을 채택하고 저감효과를 분석하기 위해 저감시설물 설치 유무에 따른 토석류 발생량을 비교하였다.

## II. 연구대상지역

강원도 평창군 진부면에 위치한 자연사면에서의 토석류 실험실험(real-scale experiment)은 수충부 및 토석류 방재기술 연구단(Research Center for River Flow Impact and Debris Flow)에서 계획하고 2차례 유효한 실험을 수행한 실험이다. 그림 1에 연구지역의 위치와 지형 및 수치해석 수행에 대한 설명을 나타내었다. 상류부에는 급한 경사를 이루고 있으며 중·하류는 완만한 경사지형을 가지고 있어 발생시킨 토석류는 급경사를 따라 발달하여 중·하류에서 침식/퇴적하게 된다. 유하구간에는 카메라 7대와 초음파수위센서(Ultrasonic level gauge) 간극수압계(piezometer), 하중계(load cell) 등의 계측기가 설치되었으며 최하류단에는 기 설치된 사방댐이 위치해 있다(김승은 외, 2012). <그림 1>에서 상류의 노란색 원형파선 부분은 토석류발생시설(debris flow generating facility)이 설치된 위치를 나타내고 하류의 노란색 원형파선은 사방댐 설치 위치지역이다.



<그림 1> 연구대상 지역



<그림 2> 토석류 발생장치 및 최상류 유하부 전경

&lt;표 1&gt; 연구현장의 토석류 발생 조건

구분	값	단위
발생량	600	m <sup>3</sup>
토조	300	m <sup>3</sup>
수조	300	m <sup>3</sup>
발생부 경사	35.5	°
공급시간	60	s
하상평균폭	3	m

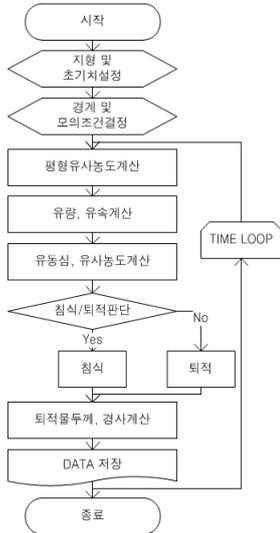
토석류 발생시설의 자세한 전경사진을 그림 2에 나타내었다. 상부의 경사는 약 35.5°로 급경사이며 토석류의 발생량은 총 600m<sup>3</sup>로 전면부 토조는 토사(300m<sup>3</sup>)로 채워지고 후면부의 수조에는 용수(300m<sup>3</sup>)을 채워 전면 개방부의 개방 시 토사와 용수가 혼합되며 유출되게 설계 되었다. 토석류 발생 장치에서의 공급시간은 약 60초이며 하상의 폭은 2-10m로 변화하며 평균폭은 3m로 산정하였다. 연구현장의 토석류 발생조건을 <표 1>에 나타내었다.

### III. 토석류 수치해석

#### 1. 수치해석조건

수치해석에서 대표적인 수치모의 조건을 매개변수 별로 아래의 <표 2>에 나타내었다. 총 모의시간은 토석류 유입시간과 유하시간을 고려하여 총 20분으로 하고 계산간격을 0.01초 고정하였다. 재료의 평균입경은 0.1m이며 토석류를 구성하는 재료의 밀도는 2,650kg/m<sup>3</sup> 이다. 매닝 조도계수를 0.03s/m<sup>1/3</sup>로 가정하였으며 침식과 퇴적을 고려하기 위한 식에 적용되는 계수를 Takahashi, *et. al.*,(1992)이 제안한 0.0007과 0.05를 각각 사용하였다. 유입토사의 체적농도는 토조가 물로 포화되었을 경우로 가정하여 0.4로 고정하였으며 유로상 침식이 가능한 유효토심을 2m로 고정하고 폭은 평균 3m를 적용하였다. 상류 토석류 발생장치로부터 하류 유출단까지의 거리는 총 810m로 실제 지형에서는 하류단 끝에 사방댐이 설치되어 있으나 수치해석에는 고려하지 않았다. 토석류 발생장치에서 토석류를 유입하기 전 약 2분간 적은 양의 물을 하상에 공급함으로써 유로에서 약한 흐름을 발생시켰다. 하상재료는 토석류 발생 전 포화된 것으로 가정하여 모의를 수행하였다.

토석류 피해를 저감하기 위한 방법으로 토석류 저감시설물(사방댐)의 설치를 선정하였다. 저감효과의 평가는 저감시설물의 설치유무에 따라 상단부, 하단부 및 유출단으로 나누어 체적을 비교하였다.

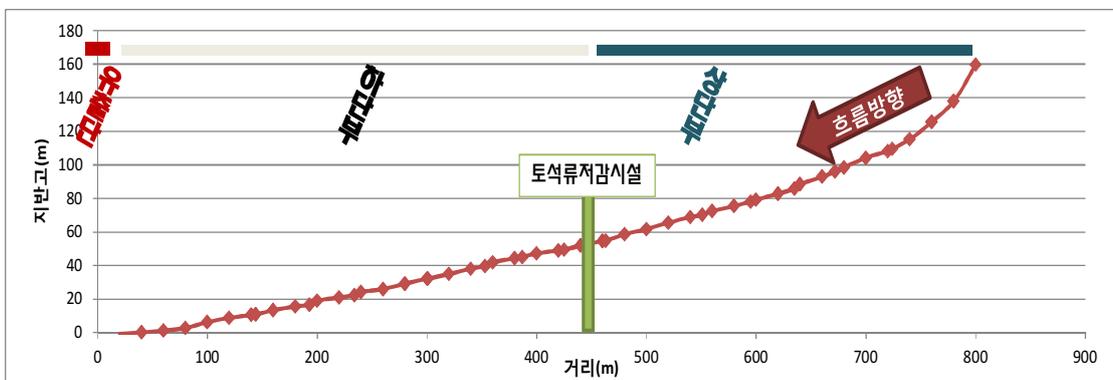


<그림 3> 토석류 해석 흐름도

<표 2> 수치모의 매개변수 조건

변수	값	단위
모의시간	1200	s
계산간격	0.01	s
재료의 평균입경	0.1	m
재료의 밀도	2650	kg/m <sup>3</sup>
간극유체의 밀도	1100	kg/m <sup>3</sup>
하상의 체적유사농도	0.65	
내부마찰각 계수(tanφ)	0.7	
중력가속도	9.8	m/s <sup>2</sup>
침식에 관한 계수	0.0007	
퇴적에 관한 계수	0.05	
매닝조도계수	0.03	s/m <sup>1/3</sup>

<그림 4>에 토석류 저감시설물의 설치위치와 유역의 경사조건 및 상·하단부에 대한 구분영역을 나타내었다. 여기서 지반고는 하단부 끝 유출단의 지반고를 영점으로 기준한 상대적인 높이를 나타낸다. 토석류 저감시설의 위치는 약 450m 지점이며 하상에서 높이 3m 규모인 중력식 콘크리트 사방댐 형식이다. 실제 지형은 만곡과 급확대 형상의 구간에 설치를 가정하였다. 하지만 수치모형에서는 만곡 및 급확대에 의한 영향을 고려하지 않았다. 상단부의 길이는 약 370m로 하단부와 비교하여 약 80m 길다.



<그림 4> 토석류 저감시설물 설치 위치 및 유역경사 조건

## 2. 기본방정식

연구지역의 수치해석은 1차원으로 해석하였다. 기본방정식은 운동량방정식 (1)을 지배방정식으로 하여 다음과 같이 크게 다섯 가지 기본방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} = gh \sin\theta_b - gh \cos\theta_b \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho_\tau} \quad (1)$$

토석류의 총 체적에 관한 연속식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = E \quad (2)$$

유사입자에 대한 연속식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial(Ch)}{\partial t} + \frac{\partial(CM)}{\partial x} = EC^* \quad (3)$$

침식과 퇴적을 모의하기 위한 토석류 침식/퇴적 속도에 대한 식 (4), (5)는 Takahashi(1991)에 의해 제안되었다.

$$E = \delta' \frac{C_\infty - C}{C^*} \frac{M}{d_m} \quad (4)$$

$$E = \delta \frac{C_\infty - C}{C^* - C_\infty} \frac{M}{d_m} \quad (5)$$

하상의 침식과 퇴적두께의 변화에 관한 식은 아래의 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial z}{\partial t} + E = 0 \quad (6)$$

여기서,  $h$ 는 유동심,  $g$ 는 중력가속도,  $u$ 는 유속,  $t$ 는 시간,  $x$ 는 흐름방향의 거리를 나타내며 토석류 혼합물질의 유량  $M$ 은  $M=uh$ 로 나타낼 수 있다.  $\theta_b$ 는 하상의 경사각도로서 퇴적층의 두께를  $z$ 라고 할 때  $\theta_b = \theta_0 + \tan^{-1}(-\partial z/\partial x)$ 로 표현할 수 있으며  $\tau_b$ 는 저면전단력,  $\rho_\tau$ 는 물과 사립자의 혼합물의 밀도이며 사립자의 밀도  $\sigma$ 와 물의 밀도  $\rho$ 에 대해  $\rho_\tau = \sigma C + (1 - C)\rho$ 와 같이 나타낼 수 있다. 또한,  $z_b$ 는 하상고,  $h$ 는 유동심을 말한다. 특히,  $E$ 는 침식/퇴적속도를 나타내는데 이 값이 0보다 클 때 침식이 이뤄지며 0 미만일 때 퇴적의 형태를 가진다.  $d_m$ 은 퇴적층의 대표입경을 나타낸다.

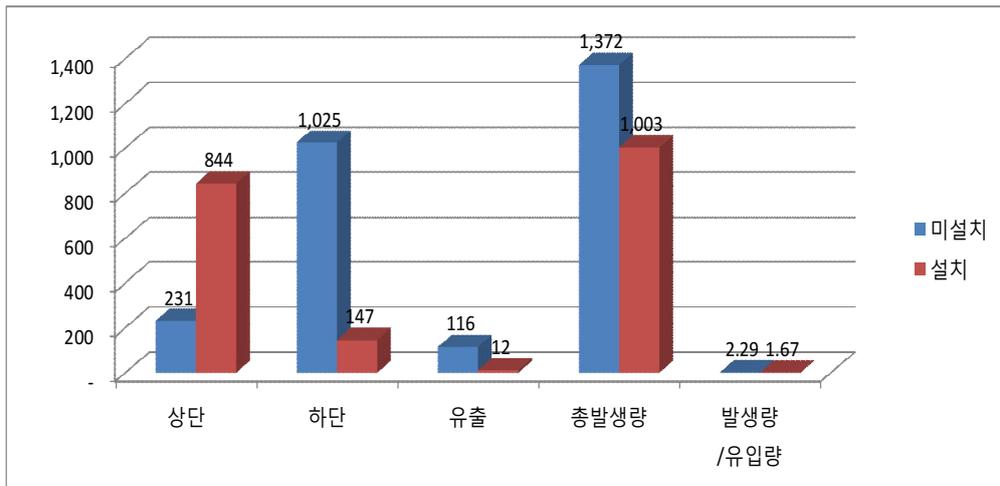
수치해석에서 토석류의 농도는 토사입자의 체적을 총 체적으로 나눈 체적유사농도를 사용하였다. 토석류의 체적유사농도  $C$ 는 이동상에서 평형유사농도  $C^*$ 가 되며  $C_\infty$ 는 해당지점의 경사에 대한 평형농도를 나타낸다.  $\delta$ 와  $\delta'$ 는 각각 침식과 퇴적속도에 관한 계수이다.

### 3. 수치해석결과

연구지역에 대한 토석류 발생량 수치해석결과를 다음의 그림 5에 각 영역에서의 토석류 발생량으로 비교하였다. 여기서 토석류 발생량은 발생부에서 유하로 인한 체적과 하상에서의 침식으로 인한 체적을 더한 값을 의미한다. 총 발생량은 모든 영역에서의 발생량을 합한 값으로 해석결과 토석류 유입량  $600\text{m}^3$  보다 2.29배 및 1.67배 더 많이 발생한 1,372와  $1,003\text{m}^3$ 로 산정되었다.

<표 3> 저감시설물 설치 유무에 따른 발생량 비교

	상단	하단	유출	총발생량	발생량 / 유입량
미설치	231	1,025	116	1,372	2.29
발생량 / 총발생량	17%	75%	8%	100%	
설치	844	147	12	1,003	1.67
발생량 / 총발생량	84%	15%	1%	100%	



<그림 5> 구분된 유출경로에서 저감시설물 설치 유무에 따른 토석류 발생량

총 발생량에 대한 각 영역에서의 발생량을 백분율로 나타낸 결과 저감시설물 미설치 시 설치지점 하류에서의 발생량이 약 83%에 이르며 유출단으로 유출되는 토석류의 체적량은 약 8%로 산정되었다. 하지만 저감시설물 설치 시 설치지점의 하류단 토석류 발생량은 총 발생량의 16%이며 유출단의 유출은 약 1%로 매우 작은 백분율을 나타냈다. 또한 상단부에서 발생한 토석류의 체적량은 미설치 시와 설치 시 각각 17%와 84%로 분석되었다.

상단부 영역의 경우 저감시설물을 설치함에 따라 발생량이 약 3.7배 증가하였다. 이러한 결과는 저감시설물에 의한 퇴적량의 증가와 침식의 저감에 의한 효과를 반영한다. 하단부 영역의 발생량은 저감시설물 시가 설치하지 않았을 경우에 비해 약 14%로 분석되어 본 연구에서 수행한 해석조건에서는 토석류 저감시설이 하류단으로 유출되는 토석류를 효과적으로 저감시킨 것으로 나타났다.



<그림 6> 토석류 실물실험 수행 직후 하류 사방댐 퇴적 전경

유출단에서의 유출량은 두 가지 조건에서 발생량이 크지 않았다. 미설치 시 유출단의 유출은 토석류 공급량의 약 1/5인 116m<sup>3</sup>이며 설치하였을 경우에 대해서는 약 1/50인 12m<sup>3</sup>로 모의되었다. 이는 하도의 경사가 완만하여 토석류가 유출단에 이르기 전 많은 양이 퇴적하기 때문인 것으로 분석된다. 이와 같은 결과는 실물실험 수행결과와도 비교적 유사한 결과를 나타내는 것으로 그림 5에서 확인할 수 있다. 그림 6은 약 600m<sup>3</sup>의 토석류를 유입한 실험수행 직후 하류단의 사방댐 전경이다. 토석류 실물 실험에서도 유출단인 사방댐 위치까지 도달한 토석류 규모가 적게 관측됨을 확인할 수 있다.

## IV. 결론

본 연구에서는 토석류로 인한 피해를 줄이기 위해 설치되는 토석류 저감시설(사방댐)의 저감효과를 예측하기 위해 1차원 수치해석모형을 모의하는 방법으로 토석류 발생량을 검토하였다. 실제규모의 토석류 실험을 수행하는 연구지역을 대상으로 저감시설의 설치유무에 따른 토석류 발생량을 비교/검토한 결과 설치를 하였을 경우가 설치를 하지 않았을 때 보다 총 발생량이 약 27% 줄어들었다. 또한 토석류 저감시설물의 설치위치를 기준으로 하류에서의 토석류 발생량은 미설치 시에 비해 약 1/7로 줄어들어 저감시설의 설치효과가 유효함을 예측할 수 있었다.

본 모형의 경우 연구지역의 지질자료 및 지형자료의 세밀한 반영이 부족하고 만곡부에 대한 고려가 되지 않은 등의 일부 한계가 있다. 따라서 모의결과에 대한 정량적인 수치를 그대로 수용하기는 어렵다. 하지만 침식과 퇴적의 모의가 가능하다는 장점이 있고 설치 유무에 따른 분석결과가 유의할 만한 경향을 나타내었다. 추후 연구대상지역에서의 실물실험 계측자료와 비교·분석하여 좀 더 정도 높은 해석결과가 도출된다면 토석류 저감시설의 효과를 예측할 수 있는 판단자료로 활용할 수 있을 것이라 사료된다.

## 참고문헌

- 김승은, 백중철, 이상돈, 한광두. 2012. 실제규모 토석류 실험을 위한 현장연구시설 소개. 한국수자원학회 논문집. 45(5): 66-73.
- 장창덕, 전계원, 전병희, 이호진, 오채연, 박환슬. 2012. 저감시설의 설치위치에 따른 토석류 유출량 해석. 2012 대한토목학회 정기학술대회. 37-49.
- Bagnold, R. A. 1954. Experiments on a Gravity-free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear. *Proc. R. Soc. London. A* 225. 49-63.
- Calligaris, C, Boniello, M. A. and Zini L. 2008. *Debris Flow Modelling in Julian Alps Using FLO-2D. Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows II*. Witpress. 81-88.
- Iverson, R. M. 1997. The Physics of Debris Flows. *Review of Geophysics*. 35(3): 245-296.
- Jun, K. W., C. D. Jang, N. G. Kim, C. Y. Oh, and B. H. Jun. 2010. Estimating the Topographical Chang by Debris Flow using LiDAR. *Proceedings of the International Symposium on Water and Sediment Disaster in East Asia*. Japan. 239-245.
- O'Brien, J. S., P. Y. Julien, and W. T. Fullerton. 1993. Two Dimensional Water Flood and

- Mudflow Simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 119: 244-259.
- Savage, S. B. and M. Sayed. 1984. Stress Developed by Dry Cohesionless Granular Materials Sheared in an Annular Shear Cell. *J. Fluid Mech* 127: 453-472.
- Takahashi, T. 1991. Debris Flow. *IAHR Monograph Series. Rotterdam* Balkema. 1-165.
- Takahashi, T., H. Nakagawa, T. Harada, and Y. Yamashiki. 1992. Routing Debris Flows with Particle Segregation. *J. Hydraul. Eng.* 118(11): 1490 - 1507.

---

**全桂元:** 충북대학교에서 공학박사학위(논문제목 : “홍수유출과 수질예측을 위한 Web기반 시스템의 개발”, 2004년 2월)를 취득하였다. 현재 강원대학교 방재전문대학원에서 부교수로 재직중이며 돌발홍수, 산지하천재해, 토석류재해에 관한 방재분야에 관심을 가지고 있다. “산악지역돌발홍수 기준우량 결정에 관한 기초연구”(2010), “지상 LiDAR를 이용한 토석류 발생량 추정에 관한 기초연구”(2010)등의 논문을 게재한 바 있다(kwjun@kangwon.ac.kr).

**田炳熙:** 동경공업대학교에서 공학박사학위(논문제목 : “Study on Porous Carrier and Membrane Hybrid Process for Nitrogen Removal in Wastewater”, 2000년 3월)를 취득하였으며, 현재는 강원대학교 삼척캠퍼스 소방방재학부 부교수로 재직 중이다. 주 연구분야는 폐탄분류를 이용한 수처리장치 고장진단과 산지재해 분야이며, 현재 방재학회 회원 등으로 활동 중이다(bhjun@kangwon.ac.kr).

**張昌德:** 강원대학교에서 공학박사학위(논문제목 : “하도형상 변화를 고려한 격자기반 토석류 해석모형의 개발”, 2012년 2월)를 취득하고 현재 강원대학교 소방방재학부 외래교수로 재직 중이다. 해안재해, 토석류, 수치모형 분야에 관심을 두고 연구 중이다(cdjang79@kangwon.ac.kr).

투 고 일: 2013년 02월 06일  
수 정 일: 2013년 02월 20일  
게재확정일: 2013년 02월 27일

## Runoff Analysis of Debris-Flow according to the Install of Reduction Facility

Kye Won Jun, Byong Hee Jun, Chang Deok Jang

It is difficult to predict the time of occurrence and location of debris flow disaster among sediment disasters due to heavy rainfalls, so it is an area that needs studies on the introduction of reduction facilities that can prevent it. The massive landslide and debris flow disaster that occurred in Gangwon-do in 2006 and the debris flow disasters that occurred in the whole area of Mt. Umyeon in Seocho-gu Seoul and the whole area of Cheonjeon-ri in Chuncheon-si in July 2011 can be said to be the incidents that show this clearly. This study predicted the volume of debris flow by whether reduction facilities (debris barriers) were installed for the research area in which a real-scale experiment was carried out and analyzed the reduction efficiency of the debris flow reduction facilities. For the prediction of the debris flow volume, a 1-dimensional numerical model analysis was used, which could simulate erosion and deposition. As a result of the analysis of the debris flow volume dividing the flow section of the debris flow into up-stream, down-stream and outlet, it was analyzed that installing reduction facilities had a reduction efficiency of approximately 27% for the stream-flow.

**Key words:** debris flow, mountainous disaster, debris flow reduction facility, numerical analysis