

## 도시생활권의 토석류 피해 저감을 위한 복합형 사방댐의 안정성 및 기능성 평가

김기대<sup>1</sup> · 김동엽<sup>1\*</sup> · 서준표<sup>1</sup> · 이창우<sup>1</sup> · 우충식<sup>1</sup> · 강민정<sup>1</sup> · 정상섭<sup>2</sup> · 이동균<sup>3</sup>

<sup>1</sup>국립산림과학원 산림방재연구과, <sup>2</sup>연세대학교 토목환경공학과, <sup>3</sup>산림기술사사무소 강림

## Evaluating Stability and Functionality of Hybrid Erosion Control Dam for Reducing Debris Flow Damage in Forested Catchment Nearby Urban Area

Kidae Kim<sup>1</sup>, Dongyeob Kim<sup>1\*</sup>, Junpyo Seo<sup>1</sup>, Changwoo Lee<sup>1</sup>, Choongshik Woo<sup>1</sup>,  
Minjeng Kang<sup>1</sup>, Sangseom Jeong<sup>2</sup> and Dongkyun Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

<sup>2</sup>Department of Civil and Environment Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

<sup>3</sup>Forest Professional Engineer Office Kanglim, Yongin 17017, Korea

**요약:** 본 연구는 도시생활권의 특성을 고려한 재해예방용 사방댐을 개발하고, 현장에서의 활용성을 검토하기 위하여 안정성 및 기능성을 평가하는 것을 목적으로 하고 있다. 필러와 바닥스크린을 활용한 토석류 방재댐과 수제를 활용한 토석류 제어댐 등 복합형 사방댐 2종을 개발하였고, 각 구조물의 정적(활동, 전도, 지지) 및 동적(부재력) 안정성을 검토하였다. 그 결과, 각 검토항목별로 충격력에 대한 안정성에 미달하는 경우도 일부 나타났으나, 대부분 항목에서 기준 안전율을 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 개발된 사방댐을 토대로 축소모형을 제작하여 수로실험을 실시한 결과, 사방댐을 설치하지 않은 대조구에 비교하여 유하물의 퇴적범위와 퇴적속도를 감소시켰고, 포착율은 평균적으로 3.5배 증가하는 것으로 나타났다. 추후 수행될 다양한 조건에서의 수로실험 결과를 바탕으로 개발된 도시생활권형 사방댐의 기능을 보다 정량적으로 구체화할 수 있다면, 이를 도시생활권에 활용하여 산지토사재해 피해를 효과적으로 저감할 수 있을 것으로 기대되었다.

**Abstract:** The objective of this study was to develop erosion control dam for preventing disaster in consideration of characteristics of forested catchment near urban area, and to assess its stability and functionality to see its practicability in the field. Two types of hybrid erosion control dams were developed including debris flow prevention dam by using pillar and float board screen type and debris flow control dam by using groyne. Also, review about their static (sliding, overturning, bearing capacity) and dynamic (member force) stability was carried out. According to the result, most of the assessed items met standard safety level although there were some cases where assessed items were short of stability criteria against impact. Also, after miniature flume experiments based on the developed erosion control dam to prove structure function (material catch, deposit), it turned out the dam decreased flow sediment amount and velocity while increasing sediment-capturing capacity by 3.5 times on average compared to the one controlled without erosion control dam. When function of erosion control dam for forested catchment near urban area is quantified based on future flume experiments in a variety of conditions, the dams can be practically used in the urban area, contribution to effectively reducing debris flow damage.

**Key words:** debris barrier dam, soil erosion control dam, urban area, stability analysis, flume experiment

\* Corresponding author

E-mail: dykim.forest@korea.kr

ORCID

Dongyeob Kim  <http://orcid.org/0000-0001-5243-0780>

## 서 론

최근 전 세계적으로 예측범위를 넘어선 국지성 집중호우가 빈번하게 발생함에 따라, 강우 유발 산지토사재해의 빈도가 증가하고, 그로 인한 피해규모도 대형화되고 있다. 우리나라 역시 산지토사재해로 인한 피해면적이 연평균 230 ha였던 1980년대에 비하여 2000년대에는 연평균 713 ha로 3배 이상 증가하였다(Korea Forest Service, 2013; Lee et al., 2015).

2000년대 이후 우리나라에서 발생한 산지토사재해의 주요한 특징 중 하나는 도시생활권에서의 산지토사재해 피해 증가이다. 우리나라는 인구밀도가 높아 국토를 집약적으로 활용하는 특성으로 인해 도시생활권이 점차 산지 지역으로 확대되고 있으며, 이에 따라 산지토사재해 발생 지역과 피해가능지역의 거리가 매우 근접하게 되어 그 위험이 가중되고 있다. 그 일례로 2011년 7월 26일과 27일에 걸친 집중호우로 인해 우면산 일대에서 발생한 토석류는 사망 18명과 부상 21명의 인명피해, 2,487가구 등의 재산피해를 발생시킴으로써 사회적 파장을 일으켰다.

도시생활권은 산지지역과의 토사재해 발생환경 및 피해특성에서 상이한 특성을 가지고 있으므로, 기존의 불투과형 사방댐은 재해예방의 목적으로 도시생활권에 적용됨에 있어 다음과 같은 한계성을 가지고 있다. 불투과형 사방댐이 대량의 유하토사를 막기 위해서는 대수면 방향에 큰 퇴사지가 요구되지만, 공간을 집약적으로 활용하는 도시생활권에서 이와 같은 대규모의 공간을 확보하기가 쉽지 않다. 또한, 과거 우리나라에서 불투과형 사방댐은 계상의 안정을 도모하는 토양보전적 목적의 구조물로 인식되어 온 관계로, 토석류를 직접 제어하는 재해예방적 관점에서 사방댐에 대한 안정성 및 기능 검토가 체계적으로 이루어지지 않았다. 마지막으로 도시생활권에서는 산지 계류수가 도시 내 하수관거로 직접 유입되는 경우가 많으나, 토석류로 발생하는 돌발성 홍수 및 유송물질이 불투과형 사방댐을 월류할 경우 하수관거의 통수능력에 대한 고려가 부족하다는 점이다.

이러한 문제를 해결하기 위해 새로운 형태·구조인 투과형, 복합형 사방댐(Cho et al., 2016; Choi et al., 2015; Kim et al., 2016; Kim et al., 2017)에 관련된 연구가 이루어진 바 있다. 투과형 사방댐은 불투과형 사방댐에 비해 계류의 물리·공간적 교란을 완화시키고(Kang, 2012), 토사와 유목을 가두고 토석류의 속도를 저감시켜 하류부에서 발생하는 피해를 최소화하는 장점(Choi et al., 2015)이 있다. 국내에서도 투과형 사방댐의 일종인 수제형 사방댐의 토사와 유목 저지, 토석류 흐름 저감(Lim, 2009; Choi et al., 2015) 및 바닥스크린을 활용한 토사 포착효

과(Kim et al., 2016; Kim et al., 2017)에 대한 연구는 일부 진행되어 왔으나, 실제 도시생활권에 적합한 사방댐을 개발·적용하는 연구는 극히 제한적으로 수행되어 왔다.

이 연구에서는 도시생활권의 특성을 고려하여 재해예방 목적의 사방댐 개발을 목표로, 필터와 바닥스크린이 결합된 토석류 방재댐, 연속적 수제형으로 구성된 토석류 제어댐 등 2종의 복합형 사방댐을 개발하였다. 또한, 개발된 사방댐이 현장에 즉시 활용될 수 있도록, 이론적인 안정성 검토와 함께 축소모형을 활용한 수로실험을 통하여 그 기능성을 평가하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 도시생활권형 사방댐 개발

본 연구에서는 도시생활권 인근 산지에서 발생하는 토석류 저지 및 피해저감을 목적으로 도시생활권 재해예방용 복합형 사방댐인 토석류 방재댐과 토석류 제어댐을 개발하였고, Figure 1의 표준제작도와 같다.

토석류 방재댐(Debris flow prevention dam)은 토석류 발생시 유송물질이 많고 도심지 및 주택가, 사회기반시설 등 산지토사재해에 대한 피해가 완전히 방지되어야 하는 계류에 설치를 목적으로 하였다. 본 사방댐은 필터와 바닥스크린을 결합한 형태로서, 필터를 통해 거석 및 유목을 저지하고 바닥스크린을 통과하면서 토사포착을 유도하게 된다. 본 사방댐의 부댐은 일반적인 사방댐과는 달리 방수로와 물빼기 구멍이 없고, 하단부에 단일 배수로만이 존재한다. 이는 토석류로 발생된 유송물질의 유출을 원천적으로 저지하고자 하는데 목적이 있다. 부댐의 제원은 전고가 7.2 m로 상장과 하장이 각각 21.0, 8.0 m, 저폭과 어깨폭이 각각 3.4, 1.0 m이다. 또한, 사방댐 최하단부인 기초에서 1.4 m 지점에 100.0 m<sup>2</sup>의 단일 배수구가 위치한다. 측벽높이 5.4m, 퇴사구역의 길이는 10.3 m이고, 계획고 2.3 m 지점에 깊이 1.5 m, 지름 0.1 m의 바닥스크린과 높이 3.0 m의 필터 4개가 설치되어 있다.

토석류 제어댐(Debris flow control dam)의 경우 상시 유수의 흐름이 있고, 상류의 계상에 잠재적으로 이동가능한 유송물질이 있는 계류에 설치를 목적으로 하였다. 연속적으로 배치된 수제군으로 형성된 곡선형 유로에서 토석류의 에너지를 감소시켜 토사를 가두고 유수를 배출하는 방식으로 도시 배수로 및 하천으로 배출 시 유속을 저감하게 된다. 본 사방댐 또한 토석류 방재댐과 같이 방수로와 물빼기 구멍이 없다. 부댐의 제원은 전고가 5.7 m로 상장과 하장이 각각 18.0, 8.0 m, 저폭과 어깨폭이 각각 3.5, 1.0 m이다. 아울러 사방댐 최하단부인 기초에서 1.4 m 지점에 100.0 m<sup>2</sup>의 단일 배수구가 위치한다. 측벽

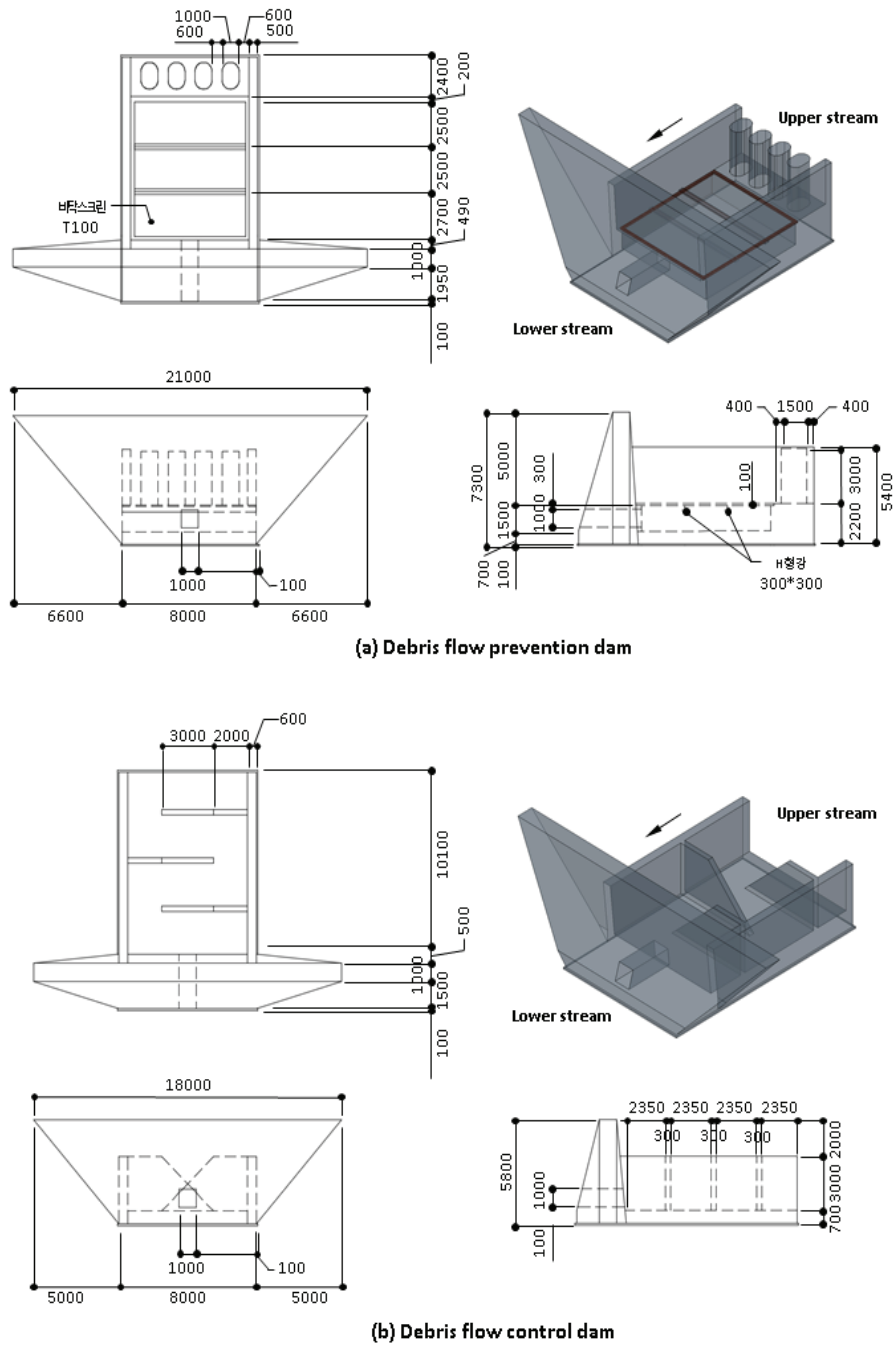


Figure 1. Triangular diagram of two developed dams.

높이 4.8 m, 퇴사구역의 길이는 10.1 m이고, 부댐 후방으로부터 2.4 m 간격으로 상하부가 각각 2.0, 3.0 m, 높이 4.8 m, 두께 0.3 m의 수제 3개가 위치한다.

2. 구조물의 정적 안정성 검토

1) 구조물의 정적 안정성 문헌 검토

도시생활권형 사방댐의 안정성 평가를 위해 사방시설 관련 기준인 사방기술교본(Korea Forest Service, 2014), 하

천설계기준(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2009)과 추가적으로 댐 설계기준(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2005) 및 구조물기초 설계기준(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2008)의 용벽부분을 검토하였다. 그 결과, 모든 기준에서 구조물이 안정하기 위해서는 활동, 전도, 지반지지에 대한 조건을 만족해야하는 것으로 기술되어 있으나, 구조물 설계 기준을 제외한 나머지 기준에는 구체적인 설계기준과 정

량적인 안전율을 제시하고 있지 않았다. 따라서 본 연구에서는 사방구조물이라는 측면에서 구조물기초 설계기준(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2008)의 안전율(활동: 1.5, 전도: 2.0, 지지력: 3.0)을 적용하였다.

2) 활동에 대한 안정성 검토

활동에 대한 안정조건은 사방댐을 수평방향으로 활동시키려는 토압 등의 힘보다 기초지반과의 접촉면에서 발생하는 마찰력이 커야하며, 그 식은 식 1과 같다.

$$FS_{sl} = \frac{\sum P_R}{\sum P_d} = \frac{\sum V \times \mu}{\sum P_d} \geq 1.5 \quad (1)$$

여기서,  $FS_{sl}$ =활동에 대한 안전율,  $P_d$ =사방댐을 활동시키려는 수평 활동력,  $P_R$ =저면과 기초지반과의 접촉면에서 발생하는 마찰저항력,  $V$ =사방댐에 작용하는 연직응력,  $\mu$ =사방댐과 지반 사이의 마찰계수이다.

활동에 대한 마찰저항력을 산정하기 위해서는 구조물의 체적, 구조물의 물성, 마찰계수가 필요하다. 따라서 구조물의 체적 등의 기초자료는 Figure 1의 표준 설계도를 이용하여 산정하였다. 또한, 부댐의 경우 콘크리트 중력식 댐으로 콘크리트 물성(23 kN/m<sup>3</sup>)을 적용하였고, 측벽과 본댐은 철근 콘크리트 물성(25 kN/m<sup>3</sup>)을 적용하였다. 마찰계수는 구조물 설계기준에 따라  $f = \tan\varphi$  식으로 산정하여 0.6을 적용하였다. 아울러 국외에서는 토석류로 인해 발생하는 충격력이 50~900 kN/m<sup>2</sup>의 범위를 나타내었다는 연구(Proske et al., 2009)도 있지만, 국내에서는 Chun(2015)이 불투과형사방댐에 작용하는 토석류 충격력을 최대 100 kN 이상으로 구분하여 안전율을 산정하는 것이 가능하다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 토석류로 인해 발생하는 충격력을 100 kN/m<sup>2</sup>로 적용하였으며, 토석류 방재댐은 필러 기둥에만 작용한 경우(단면적 12.0 m<sup>2</sup>)와 모든 면(단면적 24.0 m<sup>2</sup>)에 작용하는

것을 전제하였다. 토석류 제어댐의 경우에도 토석류에 의한 초기 충격력을 첫 번째와 두 번째 부벽에서 부담하므로 각각의 부벽에 토석류 방재댐과 동일한 충격력이 작용하는 것을 전제하였다.

3) 전도에 대한 안정성 검토

사방댐과 같이 종방향 토압을 받는 구조물 하중을 지중에 전달하는 기초의 앞굽을 중심으로 회전하려는 경향을 가진다. 이에 대한 저항이 충분치 못할 경우 전도에 의해 구조물이 불안정해질 수 있기 때문에 검토가 필요하며, 그 식 2와 같다.

$$FS_{ot} = \frac{\sum M_r}{\sum M_o} = \frac{\sum P_{vi} \times X_i}{\sum P_{hi} \times Y_i} \geq 2.0 \quad (2)$$

여기서,  $FS_{ot}$ =전도에 대한 안전율,  $M_o$ =전도모멘트,  $M_r$ =저항모멘트,  $P_{hr}$ =사방댐에 작용하는 수평력,  $Y_i$ =수평력까지의 연직거리,  $P_{vi}$ =사방댐에 작용하는 연직응력,  $X_i$ =연직력까지의 수평거리이다. 전도에 대한 저항모멘트를 산정하기 위해서는 자중 및 연직력까지의 수평거리가 필요하다. 설계하중 및 하중작용점을 산정하기 위한 가정단면도는 Figure 2와 같으며, 사방댐을 각 파트별로 구분하여 산정하였다. 이때, 구조물의 체적과 물성, 토석류 충격력(100.0 kN/m<sup>2</sup>)은 활동에 대한 안정성 검토와 동일한 조건을 전제하였다.

4) 지지력에 대한 안정성 검토

사방댐의 자중으로 인해 전달되는 지반반력이 지반의 허용지지력보다 큰 경우 지반이 침하할 가능성이 있으므로 식 3에 의해 지지력에 대한 평가가 필요하다. 이때, 지반의 허용지지력은 극한지지력을 안전율로 나눈 값으로 지반이 전단파괴가 일어날 때까지 지탱할 수 있는 최대 허용지지력으로 정의되며, 그 식은 4와 같다.

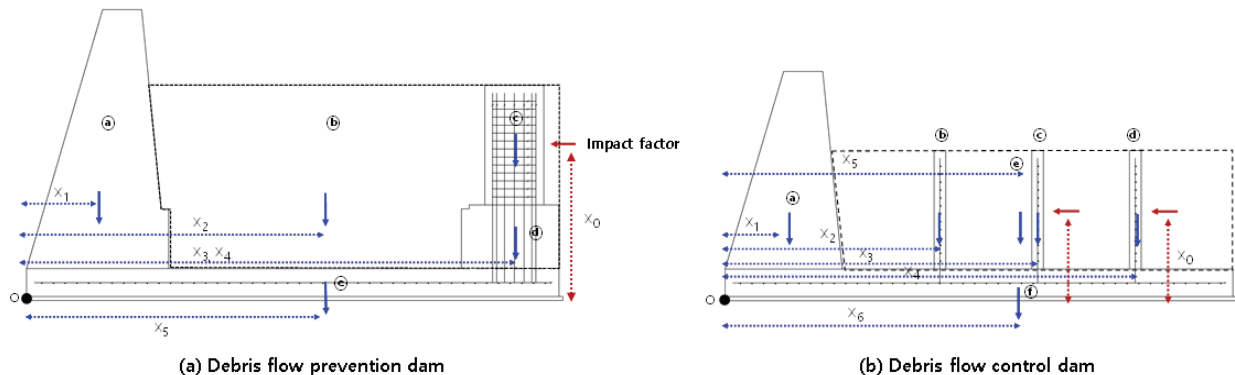


Figure 2. Profile of Sliding evaluate at two developed dams.

**Table 1. The properties of geo-material types for analysis bearing capacity.**

Content	Specific weight	Cohesion	Internal friction angle
Weathered rock	19	30	33
Soft rock	23	150	35

$$\sum q_a > \sum q_{max} \quad (3)$$

$$q_a = \frac{q_{ult}}{F_s} \quad (4)$$

여기서,  $q_a$ =토사의 허용지지력,  $q_{max}$ =최대지반반력,  $F_s$ =지지력에 대한 안전율,  $q_{ult}$ =극한지지력이다.

사방댐은 원칙적으로 암반 위에 한해서 설치하게 되어 있으나 부득이 한 경우 퇴적토사층에 설치할 수밖에 없으므로(Ryu et al., 1999; Kang et al., 2016), 본 연구에서는 지반이 토사 및 암반인 경우로 전제하여 안정성 평가를 하였다. 따라서 지반이 토사인 경우 허용지지력은 Terzaghi(1943)의 극한지지력을 적용하였고, 지반이 암반인 경우 캐나다 기초공학 매뉴얼(Canada Geotechnical Society, 1992) 공식에 따라 극한지지력을 산정하였다.

지반이 토사인 경우 Terzaghi(1943)가 제시한 기초의 지지력공식 5는 3개항으로 구성되며, 첫 번째 항은 지반의 점착력 $c$ , 두 번째 항의 기초폭  $B$ 에 의한 파괴체 크기, 세 번째 항은 푸팅근입깊이  $D_f$ 에 따른 상재하중의 영향을 나타낸다.

$$q_{ult} = \alpha c N_c + \beta \gamma_2 B N_\gamma + \gamma_1 D_f N_q \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$  및  $\beta$ =형상계수,  $c$ =지반의 점착력,  $N_c$ ,  $N_\gamma$ ,  $N_q$ =지지력계수,  $B$ =실제기초 폭,  $D_f$ =기초 근입깊이,  $\gamma_1$ =기초상부 지반의 단위중량,  $\gamma_2$ =기초하부 지반의 단위중량이다.

지반이 암반인 경우의 허용지지력은 캐나다 기초공학 매뉴얼(Canada Geotechnical Society, 1992)의 공식에 따라 식 6에 의해 산정할 수 있다.

$$q_{all} = K_{sp} \cdot q_{u-core} \quad (6)$$

여기서,  $q_{all}$ =암반의 허용지지력,  $K_{sp}$ =지지력 계수,  $q_{u-core}$ =코어의 평균 일축압축강도이다. 이때, 기초 암반의 허용지지력 하한치에 안전율 3.0을 적용한 값으로 경험적 계수는 0.1~0.4의 범위를 갖는다. 아울러 구조물의 기초를 통해 지반으로 전달되는 최대하중지지력은 식 7, 8과 같다.

$$q_{max} = \frac{V}{B} \left( 1 + \frac{6e}{B} \right) \quad (7)$$

$$e = \frac{B}{2} - x = \frac{B}{2} - \frac{M_r - M_0}{V} \quad (8)$$

여기서,  $V$ =연직하중,  $B$ =구조물 폭,  $e$ =작용하중의 합력점까지의 편심거리이다.

지반재료에 따른 물성은 일반적인 국내의 풍화암 그리고 연암의 물성(Table 1)을 적용하였으며, 지반이 토사인 경우 기초 형상계수는 직사각형 기초를 적용하였다. 또한, 지지력계수는 풍화암 물성의 내부마찰각에 따라 Terzaghi (1943)의 지지력계수를 적용하였다. 지반이 암반인 경우 경험적 계수( $K_{sp}$ )는 비교적 좁은 약한 암반의 물성을 적용하여 0.3을 적용하였고, 코어의 평균 일축압축 강도는 건설표준품셈(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2006)의 기준을 적용하였다.

### 3. 토석류 충격력을 고려한 구조물의 동적 안정성(부재력) 검토

#### 1) 구조물의 부재력 검토방법

토석류의 충격력으로 유발된 인장력은 과도한 인장변형에 의해 구조물의 파괴를 유발할 수 있다. 본 연구에서는 콘크리트 구조설계기준에 따라 부재가 받을 수 있는 휨강도 및 전단력을 콘크리트 구조설계기준(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2007)에 따라 산정하였다. 특히, 하중에 의해 발생하는 휨강도는 설계휨강도보다 작아야하며, 그 식은 9와 같다.

$$M_u \leq M_d = \phi M_n \quad (9)$$

여기서,  $M_u$ =하중에 의해 발생한 휨강도,  $M_d$ =설계휨강도,  $M_n$ =공칭 휨강도,  $\phi$ =강도 감수 계수(0.85~0.78)이다. 또한, 전단력은 하중에 의해 발생하는 설계전단력보다 작게 산정되어야하며, 식 10과 같다.

$$V_u \leq V_d = \phi V_n \quad (10)$$

여기서,  $V_u$ =전단력,  $V_d$ =전단저항력,  $V_n = V_c + V_s$ (단면의 공칭 전단강도),  $V_c$ =콘크리트가 부담하는 전단강도,  $V_s$ =전단철근이 부담하는 전단강도,  $\phi$ =전단에 대한 강도 감소 계수이다.

본 연구에서는 토석류에 의해 사방댐에 발생하는 휨모멘트와 전단력을 산정하기 위하여 빔 요소와 솔리드 요소

를 이용하여 구조물을 모델링하였으며, 지반재료를 포함한 단일재료 및 복합재료의 역학적 거동을 예측하기 위한 범용 유한요소 프로그램 ABAQUS 6.13(Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 2013)을 사용하였다. 지반의 경우 응력 및 변위영향을 받지 않는 영역까지 확장하여 경계조건을 설정하였다. 또한, 앞선 구조물의 정적 안정성 검토와 동일하게 토석류 발생시 충격력(100.0 kN/m<sup>2</sup>)이 가해지는 부위를 본댐과 측벽으로 전제하여 검토하였으며, 콘크리트 물성은 정적 안정성 검토와 동일한 값을 적용하였다.

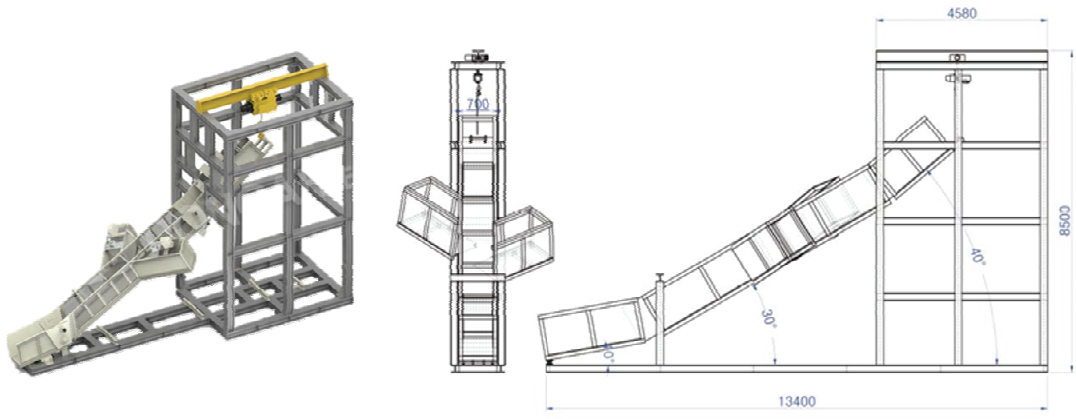
4. 구조물의 기능평가

국내외에서 실제 산지사면 및 계류에서 토석류 붕괴실험(Burns, 2006, Jun et al., 2013; Major, 1997; Zou and Chen, 2015)을 하는 경우는 있다. 그러나 상대적으로 작은 규모의 실험과 유사한 조건의 반복성을 가지는 방식으로 토석류의 흐름 특성을 연구하는 방식은 수로를 이용한 실험이 거의 유일한 것으로 알려져 있기 때문에 (Iverson, 2015; Eu, 2016) 본 연구에서는 도시생활권 인근산림의 특성인 급경사, 그리고 도시생활권과의 짧은 이격거리를 고려하여 수로실험을 실시하였다.

수로는 국내에서 발생하는 산지토사재해를 모의하기 위한 목적으로 제작된 산지토사재해 종합시뮬레이터를

이용하였다. 각 사방댐의 모형은 종합시뮬레이터의 최하단부인 유출부에서 유출토사가 양안으로 이탈하는 것을 방지하고자 유출부의 폭과 유사하게 제작하였다. 표준설계도의 사방댐 하단부 길이를 기준으로 1:11.8의 비율로 축소 제작하였고, 이를 유출부에 고정하였다(Figure 3). 또한, 시료의 퇴적범위와 사방댐의 시료 포착률을 측정하기 위해 모형의 부뎀을 제거한 후 실험을 진행하였고, 사방댐이 없는 대조구 실험을 병행하였다. 부뎀을 제거한 것은 각 사방댐의 본댐(필러+바닥스크린, 연속적 수제)의 정량적 효과를 분석하기 위함이며, 일반적인 사방댐과 비교하지 않은 것은 개발된 사방댐의 경우 저사와 배수를 동시에 하는 것으로 기능적 측면에서 상이하기 때문이다. 시료 및 경사조건은 모두 동일한 조건으로 표준사 100 kg, 입경별 5종 자갈 150.0 kg(5, 8, 15, 20, 25 mm 각각 30.0 kg), 그리고 물 0.12m<sup>3</sup>을 충분히 교반해 이용하였고, 종합시뮬레이터의 시료적재부 40°, 유하부 30°, 유출부 10°의 경사로 고정하였다. 시료의 배합비 및 수로의 경사는 실험에 있어 상류의 유송물질이 하류에 설치된 사방댐까지 유하되어 원활한 실험을 수행하기 위함이다.

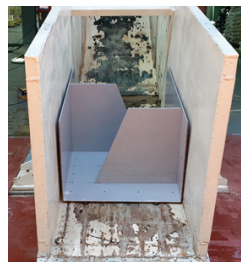
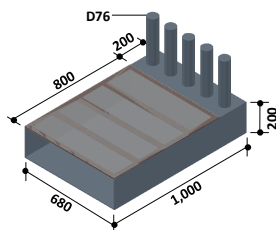
사방댐의 퇴적제어 효과 평가를 위해서 10 m 높이의 초당 5장의 촬영이 가능한 카메라를 설치하였다. 수로적재부의 수문이 개폐됨과 동시에 고속연사를 시작하여 퇴



(a) Landslide failure simulation flume



(b) Debris flow prevention dam



(c) Debris flow control dam

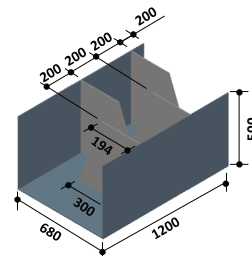


Figure 3. View of landslide failure simulation flume (a) and two developed dams miniatures (b, c).

적이 완전히 종료될 때까지 촬영하였다. 촬영된 사진에 퇴적된 시료의 경계를 표시하여 시간별로 시료의 퇴적범위를 작성하였고, 이를 이용하여 유출속도를 산정하였다. 아울러 사방댐의 시료 포착평가는 실험실시 후 사방댐 후방에 퇴적된 시료를 수집·건조하여 입자별로 중량을 측정하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 구조물의 정적 안정성

#### 1) 활동에 대한 안정성

구조물의 활동에 대한 안정성 검토 결과(Table 2), 토석류 방재댐의 활동저항력이 4,555.5 kN으로 산정되었다. 토석류의 충격력이 필러 기둥에만 작용할 경우 총 활동력은 1,200.0 kN으로 나타났고, 모든 면에 작용할 경우 2,400.0 kN으로 각각의 경우 모두 활동에 대한 안전율이 3.8, 1.9로 제시된 안전율 1.5보다 높은 값으로 나타났다. 토석류 제어댐의 경우 활동저항력이 2,724.5 kN으로 산정되었고, 충격력에 의한 활동력 2,100.0 kN에 대한 안전율이 1.3으로 기준 안전율을 만족하지 못하였다. 그러나 이는 지지대 역할을 하는 본댐의 날개부분을 고려하지 않은 것으로, 해당 부위를 고려할 경우, 활동저항력 3,415.5 kN, 안전율 1.6으로 기준 안전율을 만족하였다.

#### 2) 전도에 대한 안정성

구조물의 전도에 대한 안정성 검토 결과(Table 3), 토석류 방재댐의 저항모멘트는 42,090.6 kN/m으로 산정되었고, 토석류의 충격력이 필러 기둥에 작용할 경우 작용모멘트는 4,560.0 kN/m으로 나타났다. 따라서 토석류 방재댐의 전도에 대한 안전율이 9.2로 제시된 안전율 2.0보다 높은 값으로 나타났다. 토석류 제어댐의 경우, 저항모멘트가 21,332.6 kN/m으로 산정되었고, 작용모멘트는 4,620.0 kN/m으로 산정되었고, 안전율이 4.6으로 기준 안전율을 만족하는 것으로 나타났다.

#### 3) 지지력에 대한 안정성

지지력에 대한 안정성 검토 결과(Table 4), 토석류 방재댐과 토석류 제어댐의 지반조건이 풍화암 및 연암일 경우 허용지지력은 각각 1,795.2, 7,000.0 kN/m으로 나타났다. 구조물의 자중에 의해 지반으로 전달되는 지반반력은 토석류 방재댐과 토석류 제어댐이 각각 1,017.0, 719.2 kN/m으로 나타나 두 가지 구조물 모두 지반조건에 따른 지지력을 만족하는 것으로 나타났다.

### 2. 토석류 충격력을 고려한 구조물의 동적 안정성(부재력)

토석류 방재댐의 본댐에는 직경 15.9 cm(D16)인 이형 철근을 250.0 mm 간격으로 배치한 것을 전제로 하였다.

**Table 2. The result of assessment of two developed dams on sliding.**

Content	Sliding moment (kN)	Sliding (kN)	Stability
Debris flow prevention dam	4,555.5	1,200.0(2,400.0) <sup>z</sup>	3.8(1.9) <sup>z</sup> ≥ 1.5
Debris flow control dam	2,724.5(3,414.6) <sup>y</sup>	2,100	1.3(1.6) <sup>y</sup> ≥ 1.5

<sup>z</sup>Considering the impact force applied to pilar. and the value in parentheses that impact force applied to all side.

<sup>y</sup>Considering the impact force applied to first and second walls. and the value in parentheses that impact force applied to frist and second wall, main dam.

**Table 3. The result of assessment of two developed dams on overturning.**

Content	Overturning moment (kN/m)	Overturning (kN/m)	Stability
Debris flow prevention dam	42,090.6	4,560.0	9.2 ≥ 2.0
Debris flow control dam	21,332.6	4,620.0	4.6 ≥ 2.0

**Table 4. The result of assessment of two developed dams on bearing capacity.**

Content	Allowable bearing capacity (kN/m)	Subgrade reaction (kN/m)
Debris flow prevention dam	1,795.2/7,000 <sup>x</sup>	1,017.0
Debris flow control dam	1,795.2/7,000 <sup>x</sup>	719.2

<sup>x</sup>The value mean when the ground condition is rock/soil.

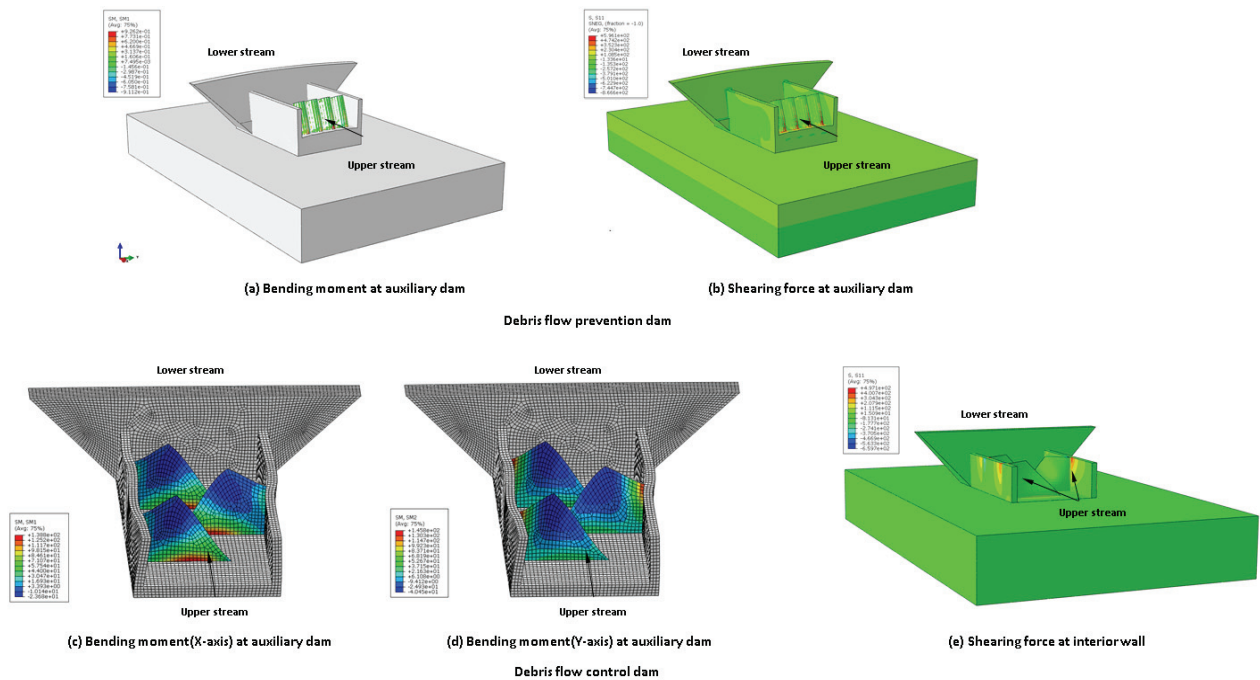
**Table 5. The result of assessment of two developed dams on member force.**

Content	Auxiliary dam		Side wall	
	Bending moment (kN/m)	Shearing force (kN)	Bending moment (kN/m)	Shearing force (kN)
Debris flow prevention dam	239.0 $\geq$ 92.0	718.0 $\geq$ 596.0 914.7 $\geq$ 596.0 <sup>w</sup>	103,840,517.3 $\geq$ 19.7	205.0 $\geq$ 10.9
Debris flow control dam	27.9 $\leq$ 138.8/145.8 168.1 $\geq$ 138.8/145.8 <sup>v</sup>	134.7 $\leq$ 497.0 628.2 $\geq$ 497.0 <sup>u</sup>	70.1 $\geq$ 20.0	137.2 $\geq$ 10.9

<sup>w</sup>In case of arranging minimum shear reinforcement.

<sup>v</sup>In case of increasing wall thickness.

<sup>u</sup>In case of arranging minimum shear reinforcement and increasing wall thickness.



**Figure 4. Member force by impact force of debris flow at the auxiliary dam following two developed dams.**

그 결과(Table 5, Figure 4), 본담의 설계휨강도 및 설계전단력은 각각 239.0 kN/m, 718.0 kN으로 나타났다. 토석류 충격력으로 발생하는 휨모멘트 및 전단력은 각각 92.0 kN/m, 596.0 kN으로 나타나 부재에 안정한 것으로 나타났다. 한편, 전단력 검토에서는 토석류 충격력으로 발생한 전단력이 설계전단력보다 크게 나타났지만 최소전단철근을 배치해야 안정성에 더욱 부합하는 것으로 나타났다. 아울러 측벽의 경우 설계휨강도와 및 설계전단력은 103,840,517.3 kN/m, 205.0 kN으로 나타났으며, 토압에 의한 휨모멘트 및 전단력이 각각 19.7 kN/m, 10.9 kN으로 철근량 및 부벽 두께를 조정하지 않고도 안정성에 부합하는 것으로 나타났다.

토석류 제어담의 수제에는 직경 12.7 mm(D13)인 이형

철근을 250.0 mm 간격으로 배치한 것을 전제로 하였다. 그 결과(Table 5, Figure 4), 수제 단면의 설계휨강도 및 설계전단력은 각각 27.9 kN/m, 134.7 kN으로 나타났다. 또한, 토석류 충격력으로 각 수제 내에 발생하는 휨모멘트는 각각 138.8, 145.8 kN/m로 나타났으며, 전단력이 497.0 kN으로 나타나 부재의 허용강도를 초과하여 불안정한 것으로 나타났다. 따라서 100 kN/m<sup>2</sup>의 충격력에 안정하기 위해서는 단면과 철근량 조정이 필요한 것으로 판단되어 수제의 철근량을 15.9 mm(D16)의 150.0 mm 간격으로 증가시키고, 두께를 600.0 mm로 증가시켜 부재력을 재산정하였다. 그 결과, 휨모멘트는 168.1 kN/m로 나타나 안정한 것으로 나타났으며, 설계전단력이 318.4 kN으로 전단철근 배치가 필요한 것으로 나타났다. 따라서 전단철



근을 배치할 경우 부벽이 부담하는 설계전단력이 628.2 kN, 토석류 충격력으로 발생하는 전단력이 497.0 kN으로 산정되어 안정한 것으로 나타났다. 아울러 측벽의 경우 설계휨강도와 설계전단력은 70.1 kN/m, 137.2 kN으로 나타났으며, 토압에 의한 휨강도 및 전단력이 각각 20.0 kN/m, 10.9 kN으로 안정성에 부합하는 것으로 나타났다.

3. 구조물의 기능평가

1) 구조물 퇴적제어 효과

대조구와 각 사방댐의 퇴적범위와 유출속도는 Table 6 과 같이 요약되었다. 사방댐이 없는 대조구의 퇴적길이가 7.1 m, 퇴적폭은 1.9 m이었으며, 시료의 유출속도는 3.4 m/s이었다. 반면, 토석류 방재댐을 설치한 경우 퇴적길이, 퇴적폭이 각각 3.3, 1.7 m, 토석류 제어댐의 경우에는 퇴

적길이, 퇴적폭이 각각 2.7, 2.3 m이었고, 두 경우 모두 시료의 유출속도는 2.2 m/s이었다. 따라서 대조구에 비해 사방댐이 있는 경우 퇴적길이와 시료의 유출속도가 현저히 감소한 것으로 나타났다(Figure 5). Eu et al.(2017)의 토석류 수로실험 결과, 토석류로 발생한 퇴적토사 길이는 유송물질의 유속과 함께 증가하는 경향을 보였는데, 본 연구에서는 사방댐이 유출토사를 포착함과 동시에 하류로 유출되는 유수의 속도저감 및 사방댐에서 저감된 에너지에 따라 퇴적범위가 감소한 것으로 해석할 수 있을 것이다. 또한, Kim(2010)과 Kwon(2013)의 토석류 모형실험에서도 동일한 결과로 나타나, 사방댐이 유목 및 퇴적토사를 제어(Chen et al., 2014)할 뿐만 아니라 사방댐에서 침투유출량을 감소시켜(Polyakov et al., 2014) 2차 피해저감에 효과적일 것으로 판단된다.

Table 6. The result of flume tests on depositional characteristics of sediment.

Content	Sediment length (m)	Sediment width (m)	Runoff velocity (m/s)
Control (Non structure)	7.1	1.9	3.4
Debris flow prevention dam	3.3	1.7	2.2
Debris flow control dam	2.7	2.3	2.2

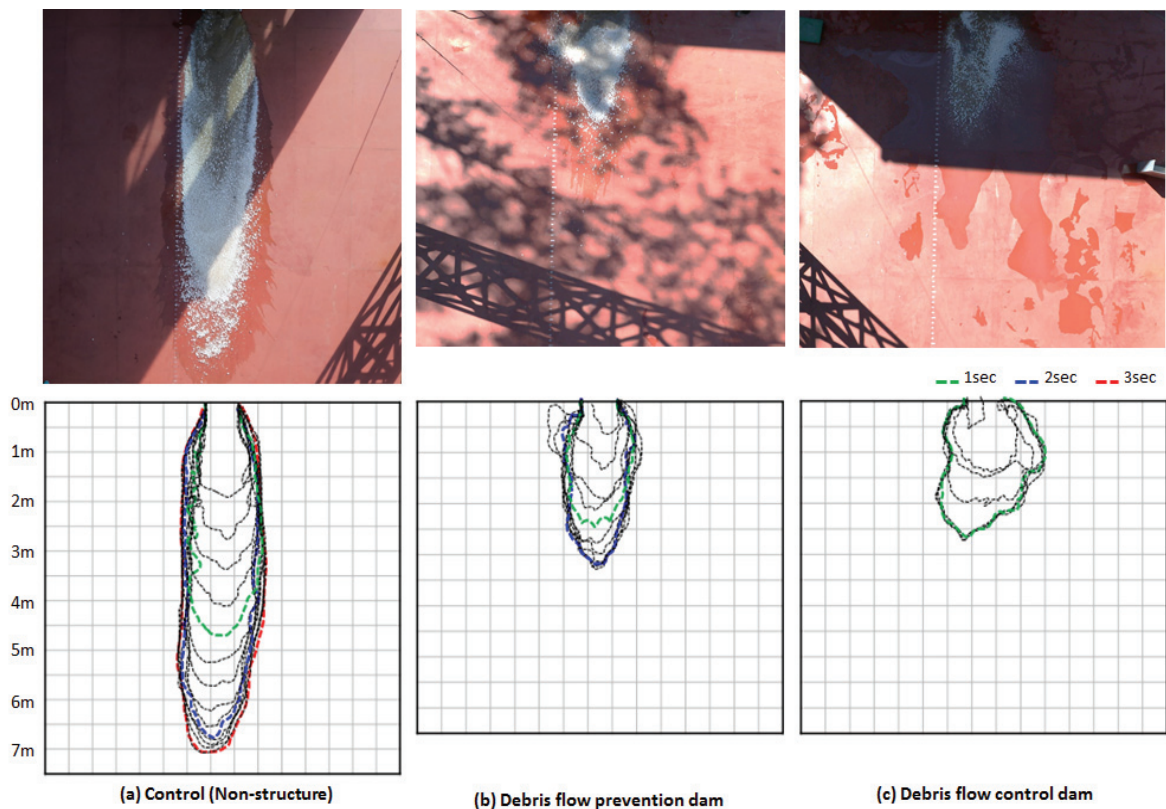


Figure 5. Isopach maps of experimental deposits following dams types.

**Table 7. The result of flume tests on sediment-capturing ability of two developed dams.**

Content	Capture volume (kg)				Capture ratio (%)
	Total	Gravel	Standard sand	G/S <sup>1</sup>	
Control (Non structure)	54.4	26.0	28.4	0.9	21.8
Debris flow prevention dam	192.5	100.0	91.4	1.1	76.6
Debris flow control dam	213.8	124.0	89.8	1.4	85.5

<sup>1</sup> Volume of gravel volume/standard sand.

그러나 퇴적폭의 경우 토석류 제어댐이 대조구보다 오히려 증가하였는데, 이는 토석류 제어댐의 구조가 유송물질의 흐름방향을 좌우로 변화시키는 형태로 시료의 횡방향 이동에너지가 증가한 것으로 추정된다. 선행연구(Yeo et al., 2006)에서 수제의 각도, 길이와 간격, 투과율에 따라 세굴의 차이가 나타난 바 있으며, 차후 수제설계에 따른 퇴적범위 제어효과에 대한 연구가 필요할 것으로 보여 해당 사방댐이 현지에 설치될 경우 계류 내에서 횡방향의 계안침식을 방지할 수 있는 구조물이 함께 설치되어야 할 것으로 판단된다.

## 2) 구조물 포착효과

사방댐이 없는 대조구에서 포착량은 54.4 kg으로 전체 시료의 21.8%가 퇴적되었다. 토석류 방재댐의 경우 포착량이 192.5 kg으로 전체 시료의 76.6%를 포착하였으며, 토석류 제어댐의 경우에는 포착량이 213.8 kg으로 시료 총량의 85.5%로 가장 높은 포착률로 나타났다. 개발된 사방댐을 설치할 경우의 포착률은 대조구에 비해 약 3.5배 이상 높은 값을 나타내었고, 일반 사방댐과 수제형 사방댐의 토사포착 특성을 연구한 Park and Ahn(2013)의 연구결과와 유사하여 개발된 두 종류의 사방댐의 토사포착 효과가 뛰어난 것으로 검증되었다(Table 7, Figure 4).

포착된 시료의 자갈/표준사 비율에서 토석류 제어댐이 1.4로 토석류 방재댐 1.1보다 높게 나타나 본 시험의 조건에서는 토석류 제어댐이 보다 큰 입경의 시료를 포착하는데 유리한 것으로 나타났다. 그러나 Mun and Ahn(2014)과 Kim et al.(2016)이 공급재료의 평균입경과 동일한 간격의 순간적으로 설치하였을 때, 상대적으로 많은 양의 공급재료가 퇴적되지 않고 외부로 유출된다는 지적과 유사한 결과로 추정된다. 따라서 수제 및 바닥스크린 간격이 계상재료의 최대입경 혹은 그 이상일 때 더 많은 양의 유송물질을 포착할 수 있을 것으로 판단된다.

## 결론

본 연구에서는 도시생활권에 적합한 복합구조의 사방

댐인 토석류 방재댐과 토석류 제어댐을 개발하였고, 이에 대한 구조적 안정성 검토 및 수로실험을 통한 기능성 검토를 수행하였다.

안정성 검토 결과, 두 종류의 사방댐 모두 활동, 전도 및 지지력 뿐만 아니라 토석류의 충격력을 가정한 외력에 대한 부재력에 대해서도 기준 안전율 값을 만족하였다. 또한, 축소모형을 이용하여 수로실험을 실시한 결과, 사방댐이 없는 대조구에 비교하여 퇴적길이와 유출속도를 적절하게 감소시켰고, 3.5배 정도 토사포착 효과를 증진시켰다. 다만 퇴적폭 및 자갈/표준사 포착비율 등에서는 특정한 경향을 찾을 수는 없었는데, 이는 실험에 이용된 시료의 입자구성 비율이나 수로의 경사, 사방댐 내 필터, 바닥스크린 등의 포착공중 및 규모에 따른 차이로 생각된다.

따라서 현장에서의 적용성을 증진시키기 위해서는 다양한 조건에서의 추가적인 실험을 통하여 개발된 사방댐 기능을 보다 정량적으로 제시하는 것이 필요하며, 이로 인해 기준 안전율의 차이가 있을 것으로 당초 설계에 있어서 유동적인 안정성 검토가 필요할 것이다. 또한, 본 연구에 활용된 수로실험이 산지계류에서의 유출토사 및 지형적 특성을 완벽하게 반영하지는 못 할뿐만 아니라 사방댐 상류의 퇴사선의 변화, 퇴사패턴 및 퇴사공간에 대한 부분은 고려되지 못하였지만, 개발한 사방구조물에 대한 정량적인 효과를 검증한 것에 대한 의의가 있으며, 해당 사방댐을 설치하고자하는 계류의 하도특성과 상류의 계상재료, 규모 등에 대한 기초자료가 파악된다면 보다 합리적으로 현장에 적용할 수 있을 것이다.

## References

- ABAQUS. 2013. Verson 6.13. Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc. Rhode Island, United States of America.
- Bruns, W.J. 2006. Bebris Flow Flume at H.K. Andrews Experimental Forest. Oregon Geology 67(1): 11-12.
- Canada Geotechnical Society. 1992. Canadian Foundation Engineering Manual. 3rd Ed. Bi-Tech Publishers, Ltd. Richmond, British Columbia, Canada. pp. 512.

- Chen, S.C., Kokuryo, H. An, S.P. and Lu, S.J. 2014. Sediment Trapping Efficiency of Modular Steel Check Dam in Laboratory Experiment and Field Observation. *Interpraevent* 2014. pp. 522-527.
- Cho, S.H., Yoo, B.S., Kim, S.H. and Lee, K.S. 2016. Performance Assessment for Debris Mitigation Structure by Using Scale Model Tests. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation* 16(5): 247-260.
- Choi, S.K., Lee, J.M., Jeong, H.D., Kim, J.H. and Kwom, T.H. 2015. Effect of Arrangement of Slit-type Barriers on Debris Flow Behavior: Laboratory-scaled Experiment. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation* 15(3): 223-228.
- Chun, K.W. 2015. Development of Stability Method on Closed-type Check Dam. Korea Forest Service. pp. 164.
- Eu, S., Im, S., Kim, D. and Chun, K.W. 2017. Flow and Deposition Characteristics of Sediment Mixture in Debris Flow Flume Experiments. *Forest Science and Technology* 13(2): 61-65.
- Eu, S. 2016. Analysis of Debris Flow Behavior with Flume Experiments. Mater, Thesis. Seoul National University. Seoul, Republic of Korea.
- Iverson, R.M. 2015. Scaling and Design of Landslide and Debris Flow Experiments. *Geomorphology* 224: 9-20.
- Jun, K.W., Jun, B.H. and Jang, C.D. 2013. Runoff Analysis of Debris-Flow according to the Install of Reduction Facility. *Crisisonomy* 13(4): 117-128.
- Kang, H.J. 2012. Spatial and Temporal Change by River Restoration and Biological Diversity Influence by River Structure in Mountain Stream. Mater, Thesis. Tohoku University. Sendai, Japan.
- Kang, M.J., Kim, K.D., Oh, K.S., Park, J.W. and Park, J.H. 2016. Analysis of Forest Environmental Factors on Torrent Erosion Work Area in Gyeongsangnam-do: Focus on Erosion Control Dam and Stream Conservation. *Journal of Agriculture & Life Science* 50(5): 111-120.
- Kim, J.H., Chun, K.W., Seo, J.i., Kim, S.W., Yun, J.U. and Jun, K.W. 2016. An Examination of Optimum Slit Aperture to Flat-board Debris-flow Beaker in Resident Piedmont Areas. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation* 12(4): 73-83.
- Kim, J.H., Chun, K.W., Seo, J.i., Kim, S.W., Yun, J.U. and Jun, K.W. 2017. Magnitude and Frequency of Debris-flows Controlling the Storage Pattern on the Flat-board Debris-flow Breaker. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation* 13(4): 133-149.
- Kim, K.H. 2010. The Spreading of Debris Flow in Model Test and Effect of Mitigation Facilities. Master, Thesis. Sangi University. Wonju, Republic of Korea.
- Korea Forest Service. 2013. 2013 Main Business Plan Details. Korea Forest Service. 2014. Textbook of Erosion Control Technique. pp. 432.
- Kwon, J.H. 2013. Model Experimental Study with Consideration for Grain Composition of Debris Flow in Korea. Seokyeong University. Seoul, Republic of Korea.
- Lee, C.W., Kim, D.Y., Woo, C.S., Kim, Y.S., Seo, J.P. and Kwon, H.J. 2015. Construction and Operation of the National Landslide Forecast System Using Soil Water Index in Republic of Korea. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation* 15(6): 213-221.
- Lim, H.Y. 2009. Capture Effect of Slit Sabo Dam for Debris Flow and Woody Debris with Hydraulic Model Experiment. Mater, Thesis. Kangwon National University. Chuncheon, Republic of Korea.
- Major, J.J. 1997. Depositional Processes in Large-scale Debris-flow Experiments. *The Journal of Geology* 105(3): 345-366.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2005. Standard of Dam Design. pp. 493.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2006. Build of Standard Quantity Per Unit . pp. 1406.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2007. Standard of Concrete Structure. pp. 334.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2008. Standard of Structure Footing Design. pp. 101.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2009. Standard of River Design. pp. 596.
- Mun, B.G. and Ahn, Y.S. 2014. Analysis of Debris Flow Capture Effect with a Slit-Check Dam Gap using Model Experiment. 2014 Proceeding of Korean Forest Union. pp. 270.
- Park, H.G. and Ahn, Y.S. 2014. Analysis of Debris Flow and Woody Debris Reduction with Erosion Control Structure using a Model Experiment. 2013 Proceeding of Korean Forest Union. pp. 271.
- Polykov, V.O., Nichos, M.H., McClaran, M.P. and Nearing, M.A. 2014. Effect of Check Dams of Runoff, Sediment Yield, and Retention on Small Semiarid Watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation* 69(5): 414-421.
- Proske, D., Suna, J., Hübl, J. 2009. Estimation of Design Impact Forces of Debris Flows. *Proceeding of Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering System*. pp. 1323-1330.
- Rye, T.K., Jang, K.K. and Park, S.M. 1999. Decision of the Dam Site for the Soil Erosion Control and the Water

- Resource Management. *Journal of Life Science and Natural Resource Research* 21: 91-103.
- Terzaghi, K. 1942. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons. New York, United States of America. pp. 510.
- Yeo, H.K., Kang, J.G., Kim, S.J. and Rho, Y.S. 2006. An Experimental Study on Scour Area around Groynes with Permeability and Install Angle. *Journal of Korea Water Resources Association* 39(7): 583-592.
- Zou, Y.H. and Chen, X.Q. 2015. Effectiveness and Efficiency of Slit-check Dam System on Debris Flow Control. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions* 3: 5777-5804.
- 
- (Received: October 26, 2017; Accepted: December 7, 2017)