

산림유역의 만사 사방댐에 의한 토사유출 조절 효과 추정

서정일¹ · 전근우^{2*} · 송동근³

¹공주대학교 산림자원학과, ²강원대학교 산림자원학과, ³주식회사 백림

Estimation of Sediment Discharge Controlled by Sediment-filled Check-dam in a Forested Catchment

Jung Il Seo¹, Kun Woo Chun^{2*} and Dong Geun Song³

¹Department of Forest Resources, Kongju National University, Yesan 32439, Korea

²Department of Forest Resources, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

³Baekrim Co., Ltd., Incheon 21540, Korea

요약: 이 연구에서는 2006년 집중호우 시 산사태 및 토석류가 발생한 강원도 인제군의 기룡산 유역을 대상으로 사면붕괴 및 계상변동을 추정하여 만사 상태에 도달한 불투과형 사방댐이 토사유출 조절에 미치는 영향을 정량적으로 해석하고, 이를 토대로 사방댐의 설계 및 준설기준을 고도화하는 데에 필요한 새로운 인자를 제안하였다. 일반적으로 사방댐은 계획평형기울기 구간과 계획홍수기울기 구간에서 각각 토사유출의 억제와 조절 기능을 발휘하고 있다. 연구대상유역에 시공된 불투과형 사방댐은 계획억제토사량에 해당하는 저사량이 2,111 m³로 설계되었지만, 2006년 집중호우로 인한 산지교란 발생 시에는 해당 사방댐 직상부로부터 250 m의 계류구간에 걸쳐 3,996 m³의 유출토사를 조절한 것으로 관측되었다. 결과적으로 해당 사방댐은 유출토사 억제를 위한 계획억제토사량보다 큰 규모의 계획조절토사량을 나타내어 만사된 이후에도 유출토사의 조절이라는 사방댐의 기능을 발휘하고 있었다. 이와 같이 사방댐의 토사유출 조절기능은 토사유출 억제기능과 구분하여 평가하여야 하지만, 현재 우리나라에서는 현지에서 유역 특성을 실측한 자료를 기반으로 한 계획억제토사량 또는 계획조절토사량을 사방댐의 설계 및 준설기준 인자로서 고려하고 있지 않다. 따라서 합리적인 사방댐의 설계 및 유지관리 기준을 마련하기 위해서는 사방댐의 토사유출 억제 기능과 조절기능을 정량적으로 해석한 현장자료가 축적되어야 하며, 이는 우리의 사방기술이 보다 객관적이고도 체계적인 면모를 갖춘 과학적 기술로 발전할 수 있는 방안일 것이다.

Abstract: To estimate the sediment discharge controlled by sediment-filled check-dam and thereby enhancing factor for check-dam design and dredging criteria, we surveyed slope failures and stream-bed fluctuation caused by geomorphic disturbances (i.e., landslides and debris flows) in Inje, Gangwondo. In general, check-dams play roles for restraining and controlling sediment discharge within a section under the design equilibrium gradient and a section under the design flood gradient, respectively. The results in this study showed same pattern: that is, the closed type check-dam, which has a design restraint sediment discharge of 2,111 m³, estimated to control a sediment discharge of 3,996 m³ in the stream section within 250 m right upper area immediately after the disturbances occurred in 2006. As a result, a design control sediment discharge of the check-dam was larger than its design restraint sediment discharge. This represents that the check-dam is still having an own function for controlling sediment discharge although it exceeded the designed capacity by the sediment discharged from upstream during the disturbances. Our finding suggests that the sediment discharge controlling of check-dam may need to be evaluated separately from its sediment discharge restraint. Currently, the country, however, does not consider the design control (or restraint) sediment discharges, based on the actual field survey, as criteria for check-dam design and/or dredging work. Therefore, the accumulation of the quantitative data is required to support that check-dam has functions for both restraining and controlling sediment discharge. This would be a way to develop our erosion control technology to the scientific technology equipped with a more objective and systematic aspects.

Key words: geomorphic disturbance, closed type-check dam, design equilibrium gradient, design flood gradient, design restraint sediment discharge, design control sediment discharge

*Corresponding author
E-mail: kwchun@kangwon.ac.kr

서 론

산림은 육상 및 계류생태계를 연결하는 공간적 요소이며, 인류의 생존기반으로서 산소공급 및 수토보전 등의 환경조절 기능, 다양한 산물을 생산하는 경제적 기능 및 예술적·문화적 배경으로서의 문화적 기능을 갖고 있다. 특히, 우리나라의 경우 국토 면적의 63% 이상이 산림으로 덮여 있어 삶의 질에 대한 요구가 사회적 이슈로 부각되고 있다. 그러나 최근 지구온난화와 엘니뇨 현상 등의 기상이변으로 인해 태풍 및 집중호우의 발생빈도가 점차 증가하고 있으며, 그 규모 역시 더욱 대형화되고 있는 추세이다. 이러한 이상 현상은 산림유역에서의 산사태 및 토석류 등의 산지교란으로 이어지게 되며, 이로 인해 많은 양의 토사가 일시적으로 산지계류로 유입하게 된다(Kim et al., 2012).

계류로 유입된 토사는 다시 후속류 등에 의해 하류로 이동하거나 퇴적함으로써 하도의 급격한 계상변동을 초래할 뿐만 아니라 계안과 접하고 있는 수변역을 파괴함으로써 육상 및 계류생태계의 급격한 변화를 야기하게 된다(Nakamura et al., 2000; 2007). 특히, 국토의 유용면적이 적은, 다시 말해 산지와 인간의 생활권이 근접해 있는 우리나라의 경우, 산지를 배후로 하고 있는 주거 및 생산 공간까지 토사가 유출되어 농경지, 교량, 도로 및 주택 등의 재산 피해는 물론 인명피해의 원인이 되기도 하며, 이는 인간의 생활공간이 평야부로부터 점차 산록 혹은 계곡의 상류부로 확대됨에 따라 더욱 증가하고 있는 추세이다(Kim, 2011).

이러한 산지토사재해로부터 안전한 생활공간을 확보하기 위하여, 즉 집중호우 등의 자연현상으로 인한 산사태 및 토석류 등에 대응할 목적으로 다양한 사방사업이 진행되어 왔다. 특히, 1986년 국내에서 최초로 시행된 사방댐 설치사업은 계상물매의 완화에 의한 안정물매 유도, 종·횡 침식의 방지, 산각의 고정과 산복붕괴 방지 등의 방제기능을 발휘함으로써 토사를 포함한 계상퇴적물의 유출을 억제 및 조절하는 대표적인 사방사업이다(Chun, 2011). 이러한 사방댐은 2000년에 발생한 동해안 대형산불에 의하여 막대한 산림이 파괴된 이래 적극적으로 도입되었으며(Korea Forest Service, 2007), 최근에는 사방댐의 설계기준 고도화에 대한 요구와 함께 유지관리 면에서 만사된 사방댐을 중심으로 한 준설의 시행여부에 대한 논의가 심도 있게 이루어지고 있다.

산지토사재해가 빈번히 발생하고 있는 일본에서는 정부차원의 고도화된 사방댐 설계기준이 마련되어 있으며(Japan River Association, 2002a; 2002b), 각 도도부현(都道府県)은 이를 기본으로 현지 실정에 맞는 설계가 수행되도록 하고 있다(e.g., Crisis-Management Division in Hiroshima Prefecture, 2012). 또한, 토석류 및 유목 대책의

일환으로 사방댐의 준설계획을 필요에 따라 선택적으로 수립하고 있으며, 이때 사방댐 직하부의 보존대상 존재 여부와 해당 사방댐의 기대효과가 준설 여부를 결정하는 주요 항목으로 채택되고 있다(e.g., Erosion Control Division in Tottori Prefecture, 2014). 우리나라 역시 「사방사업의 설계·시공 세부기준」을 통하여 사방댐 설계의 근거를 마련하였으며(Korea Forest Service, 2015a), 「사방시설의 유지관리 매뉴얼」에 사방댐 준설 시행의 평가기준을 제시하였다(Korea Forest Service, 2015b). 그러나 이러한 설계 및 준설과 관련된 기준들을 뒷받침할 수 있는 정량적 자료를 근거로 한 연구사례는 거의 진행되지 못하고 있는 실정이다. 다만, 설계와 관련하여서는 철강제로 만들어진 투과형 사방댐, 불투과형 사방댐, 유목포착공 등의 사방구조물을 대상으로 한 일본의 설계 기준 소개(Chun, 2012)와, 강우-유출 관계의 물리적인 특성에 영향을 미치는 지형학·수문학적 해석을 접목시킨 GIUH(Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph) 모델을 이용하여 사방댐의 설계홍수량 산정의 적정성을 검토한 연구(Lee, 2015)가 진행되었을 정도이다. 또한, 준설과 관련하여 투과형 및 불투과형 사방댐을 대상으로 사방댐의 저사능력에 따른 준설량을 분석하여 사방댐 유형 및 규모 결정에 필요한 자료를 제공한 연구(Park et al., 2013)와 지상 LiDAR 자료를 이용하여 사방댐의 준설이 계류의 지형변화에 미치는 영향을 분석하여 준설이 오히려 상류부 계상의 급격한 변화를 초래한다는 연구(Seo et al., 2014)가 진행되었을 정도이다.

이러한 관련 연구의 부족은 결국 사방댐의 설계 및 관리방안의 수립이라는 관점에서 볼 때 매우 치명적인 약점이 될 수 있다는 점에 주목할 필요가 있다. 따라서 이 연구에서는 강원도 인제군에 위치한 기룡산 유역을 대상으로 산사태 및 토석류 등의 산지교란으로 인한 사면붕괴 및 계상변동을 추정하여 만사 상태에 도달한 사방댐이 토사유출 조절에 미치는 영향을 정량적으로 해석하고, 이를 기초로 사방댐의 설계 및 준설기준을 고도화하는 데에 필요한 새로운 인자를 제안하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지 개요

연구대상지는 소양강 지류의 산지계류로서 행정구역상 강원도 인제군 인제읍 상동리 기룡산 일대의 유역에 속한다(Figure 1). 이 유역은 총 집수면적이 315.8 ha 정도의 산림유역으로 해발고 200~930 m의 범위에 위치하고 있고, 능선부는 완사면의 형태를 띠고 있는 반면에 계곡부는 급경사면의 형태를 띠고 있는 복합사면 구조를 나타내고 있으며, 특히 급경사 지역은 약 50~100 cm의 얇은 표

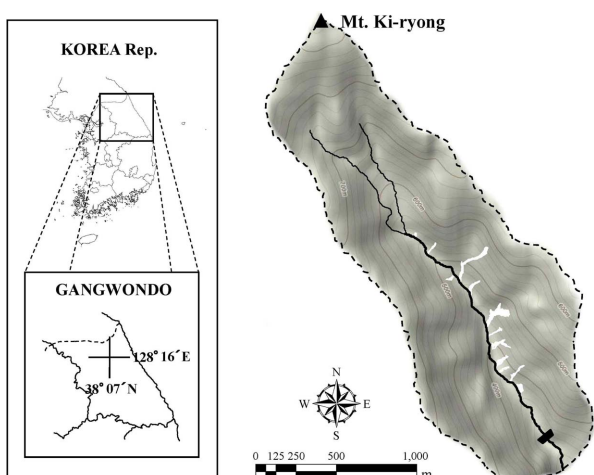


Figure 1. Location of the study basin originated from Mt. Ki-ryong in Inje, Gangwondo. Dotted line denotes drainage boundary. Within the boundary, the narrow solid-lines and the wide solid-line represent all channels including small tributaries and study section surveyed in main stem channel, respectively. White-shaded parts and black-filled trapezoid display the areas collapsed by landslides and the check-dam, respectively.

토층이 암반층 상부에 형성되어 있다. 유역 내 산림은 혼효림으로 이루어져 있으며, 계류를 중심으로 평균흉고직경 약 20 cm, 평균수고 약 14 m의 계안림이 형성되어 있다.

연구대상지로부터 가장 근거리(유역의 입구로부터 직선거리 0.5 km 이내)에 위치한 인제군 기상관측소의 관측자료에 따르면, 연구대상지의 2000년부터 2009년까지의 과거 10년간 연평균 기온은 약 10.5°C이며, 이 기간 동안 발생한 연평균강우량은 1,293 mm 정도로 이 중 대부분이 7월부터 10월에 걸친 여름철 집중호우나 가을철 태풍에 의해 발생하였다. 특히, 이 유역은 지난 2006년 7월에 발생한 장기간에 걸친 장마와 제3호 태풍 「에위니아」로 인한 집중호우로 대규모 산사태가 발생한 지역이다. 이 지역의 산사태는 표토 하부의 단단한 암반층과 불투수성 모재층이 있는 지역을 중심으로 발생하여 다량의 토사, 거력 및 유목을 생산하였으며, 토석류와 후속류 등에 의하여 하류로 유출되어 대규모의 계상변동을 야기하였다(Seo et al., 2011). 계류의 양안은 부분적으로 모암이 노출되어 있으며, 계상에는 거력 및 돌출형 암반에 의해 불규칙적인 스텝-풀(step-pool)이 형성되어 있지만, 일부 경사가 비교적 완만한 퇴적구간에는 풀-리플(pool-riffle) 패턴의 계상형상이 부분적으로 나타나고 있다.

한편, 계류의 하류구간에는 계상안정 및 토사유출을 방지할 목적으로 설치된 불투과형의 중력식 콘크리트사방댐(저수량 2,111 m³, 상장 32 m, 하장 24 m, 유효고 5 m)이 위치하고 있다. 이 사방댐은 현지측량 결과로부터 추정할 때 2004년 10월에는 방수로 천단으로부터의 여유고를 기준으로 토사퇴적율이 약 30%였지만, 산지교란 발생

직후인 2006년 7월 말에는 만사되었다.

2. 연구방법

1) 현지조사

연구대상지인 기룡산 유역은 산지토사재해 발생 잠재성이 매우 큰 유역으로, 2004년 10월 29일에 산지계류 본류를 중심으로 계상 미지형 및 계상 재료의 분포상황 등에 대한 기초조사를 실시하였으며, 이듬해인 2005년 6월과 10월에도 현지답사를 통하여 계상변동 및 사방댐에 의한 저사율 변화를 확인하였다. 이후 집중호우로 인한 대규모의 산지교란이 발생한 직후인 2006년 7월 28일에 현지를 답사하여 사진촬영 및 현장스케치를 기본으로 한 기초조사를 실시하였으며, 2006년 7월 30일에 다시 본류구간을 대상으로 계류에 접한 산복, 계안 및 계상미지형에 관한 정점측량을 실시하였다. 산지교란 발생 후 2년이 경과한 2008년 10월 8일에도 사방댐의 상류구간을 중점 대상으로 정점측량을 실시하여 사방댐에 의한 저사구간에서의 미지형 변화를 파악하였다.

한편, Nakamura et al.(2015)에 따르면, 동아시아 지역에 있어서 소규모 산림유역에서 발생한 토사유출에 영향을 미치는 최적 강우인자는 반감기가 3일인 110 mm 이상의 실효우량(일강우량으로부터 추정)인 것으로 보고되었다. 이에 착안하여 2004년 10월 최초의 현지조사 이래 2006년 7월 산지교란이 발생한 시기까지 인제군 기상관측소가 관측한 일강우량을 분석한 결과, 2005년 6월 26~27일에 기록된 33 mm/day와 126 mm/day의 일강우량으로부터 추정된 153 mm/day와 122 mm/day의 실효우량이 토사유출에 영향을 미칠 수 있는 유일한 강우사상으로 확인되었다. 그러나 2005년 6월과 10월에 실시한 현지답사에서는 산사태, 계안침식 및 계상변동 등의 산지교란은 물론 사방댐의 저사량 변화도 파악되지 않았다. 이와는 달리 2007년과 2008년에는 각각 2회씩의 강우사상에 걸쳐 111~242 mm/day 범위의 실효우량이 발생하였으며, 이 기간 중 사방댐 저사구간에서의 미지형 변화를 확인할 수 있었다.

2) 산사태로 인한 토사유입량 추정

산사태로 인한 토사유입량은 계류로의 붕괴토사 유입 흔적이 현저한 산사태 발생지를 대상으로 추정하였다. 먼저 산사태 붕괴지 하부에서 상부방향으로 복수의 횡단측선을 설정하고, 각 측선별로 정점측량을 실시하여 다음과 같은 식에 의해 각 사면구간(n)별 토사생산량(V_{slope_n} , m³)을 산출하였다.

$$V_{slope_n} = \frac{(A_{slope_i} + A_{slope_j})}{2} \cdot l_{slope}$$

여기서 A_{slope_i} 는 각각 n 사면구간의 하부측선인 i 측선상의 횡단면적(m²), A_{slope_j} 는 n 사면구간의 상부측선인 j 측

선상의 횡단면적(m^2), l_{slope} 은 i 측선과 j 측선 간의 사면거리이다. 이렇게 계산된 각 사면구간별 토사생산량의 합계를 산사태로 인한 계류로의 토사유입량으로 간주하였다.

한편, 대상구역에서는 산사태로 인해 생산된 토사가 일부 지류구간을 거쳐 본류로 유입된 흔적을 발견할 수 있었으며, 이 경우 지류구간에서는 계안침식이 발생한 것을 관측할 수 있었다. 그러나 산사태로 인해 본류로 유입된 토사량이 과대하게 산정되는 것을 피하기 위하여 지류구간에서의 토사 침식량 및 퇴적량은 동적 평형상태를 유지하는 것으로 가정하였다.

3) 계안·계상에서의 토사침식량 및 퇴적량 추정

토사가 계류로 유입 또는 이동하는 주된 원인에는 산사태 이외에 계안붕괴와 계상침식 등이 있다. 따라서 토사 유입량을 추정함과 동시에 계상에서 발생하는 토사의 침식량 및 퇴적량을 파악하기 위하여 연구대상지의 본류구간을 대상으로 하여 산지교란 발생 전·후에 정점측량을 실시하였다. 산지교란 발생 이전인 2004년 10월 29일에 실시한 현지조사에서는 조사구간 최하단부로부터 본류 2.45 km 구간을 50 m 간격으로 기본측선을 설정하였으며, 사행부와 확폭부 및 사방댐 설치 구간 등에 보조측선을 설정하였다. 산지교란 발생 이후인 2006년에도 2004년과 동일한 측선에 대하여 정점측량을 실시할 예정이었지만, 최하류에 위치한 0.5 km 구간의 측선표식이 계안붕괴로 인하여 유실되었기 때문에 상류의 1.95 km 구간에 대해서만 측정하였다. 물론 측량을 실시한 1.95 km 구간 내에서도 계안붕괴로 인하여 국소적으로 측선표식이 유실되었지만, 이 경우 하류에 위치한 측선으로부터 50 m 상류 지점에 측선을 재설정된 뒤 측량을 실시하였다. 산지교란 발생 후 2년이 경과한 2008년 10월 8일에는 사방댐 직상부로부터 약 0.5 km 구간에 걸쳐 기 설정되어 있는 기본측선 및 보조측선에 대하여 정점측량을 실시하였다.

이와 같은 방법으로 얻어진 산지교란 전·후의 측량자료를 이용하여 조사구간의 계상변동량($V_{channel_n}$, m^3)을 다음과 같은 식으로 산출하였다.

$$V_{channel_n} = \frac{(A_{channel_i} + A_{channel_j})}{2} \cdot l_{channel}$$

여기서 $A_{channel_i}$ 는 n 계류구간의 하류측선인 i 측선상의 횡단면변동량(m^2), $A_{channel_j}$ 는 n 계류구간의 상류측선인 j 측선상의 횡단면변동량(m^2), $l_{channel}$ 은 i 측선과 j 측선 간의 계류거리를 나타낸다.

4) 계류의 토사수지 추정

이상에서 파악된 산사태로 인한 토사유입량, 그리고 계안 및 계상에서의 토사침식량과 토사퇴적량을 이용하여

다음의 식에 따라 연구대상 계류에 있어서의 토사수지를 추정하였다.

$$V_{slope_n} + V_{upstream_n} + V_{downstream_n} = V_{channel_n}$$

여기서 $V_{upstream_n}$ 는 n 계류구간의 상류로부터 유입되는 토사량, $V_{downstream_n}$ 는 n 계류구간의 하류로 유출되는 토사량을 나타낸다. 단, 연구대상계류의 최상부로 유입되는 토사유입량은 '0'으로 간주하여 토사유출이 과대로 추정되지 않도록 하였으며, 일정 계류구간에서의 토사유출량은 직하류부의 계류구간에서의 토사유입량과 동일한 것으로 가정하였다.

결 과

1. 산지교란 시 산사태지에서 계류로 유입된 토사

연구대상구역에 있어서 계류로 토사를 유입시킨 산사태지는 12개소로 총 14,237 m^3 의 토사를 유입시킨 것으로 나타났다(Table 1). 이 중에서 최대치인 약 3,303 m^3 정도의 토사를 계류로 유입시킨 산사태지는 유역 하구로부터 1,095~1,120 m 지점에 연접해 있었다. 이어서 1,430~1,470 m 지점, 945~975 m 지점 및 630~650 m 지점의 산사태지 순으로 각각 2,467 m^3 , 1,599 m^3 및 1,415 m^3 정도의 토사를 계류로 유입시킨 것으로 나타났으며, 최상류부인 1,865~1,885 m 지점에서 최소량인 약 226 m^3 의 토사가 산사태에 의해 계류로 유입된 것으로 나타났다.

2. 산지교란 시 계안·계상에서의 토사 침식 및 퇴적

산사태로 인하여 토사가 유입된 이후에 계안 및 계상에

Table 1. General characteristics of sites collapsed by landslides.

No.	Sediment input location* (m)	Mean slope of site collapsed (°)	Depth of site collapsed (m)	Sediment input volume (m^3)
1	1,865~1,885	41	0.82	225.50
2	1,720~1,745	35	1.16	399.62
3	1,475~1,490	35	0.94	648.60
4	1,430~1,470	17	1.23	2,467.38
5	1,330~1,365	27	1.01	656.50
6	1,095~1,120	23	1.00	3,303.20
7	1,030~1,045	35	0.87	665.55
8	945~975	24	1.05	1,598.63
9	800~825	40	0.87	1,106.64
10	735~750	35	0.92	540.96
11	630~650	25	1.11	1,415.25
12	550~600	35	1.05	1,209.60
Sum				14,237.43

*All values in the column 'Sediment input location' represent the upstream distances from the outlet (i.e., the lowest survey line) of study reach.

Table 2. Stream-bed fluctuation caused by disturbance along the upstream distance of the study reach.

Upstream distance* (m)	Stream-bed fluctuation** (m ³)			Note
	Pre-disturbance	Post-disturbance	Difference	
1,900~1,950	1,396.73	1,397.87	-1.14	
1,850~1,900	1,688.19	1,384.49	+119.09	- No. 1 landslide
1,800~1,850	1,721.57	1,454.98	+104.54	
1,750~1,800	1,220.04	1,272.78	-52.73	
1,700~1,750	899.30	834.14	+65.15	- No. 2 landslide
1,650~1,700	1,033.56	817.95	+215.61	
1,600~1,650	1,183.00	1,091.45	+91.55	
1,550~1,600	1,253.76	1,353.98	-100.22	
1,500~1,550	1,180.65	1,331.33	-150.68	
1,450~1,500	2,380.33	2,716.64	-336.32] No. 3, 4 landslides
1,400~1,450	2,511.56	3,110.57	-599.01	
1,350~1,400	1,618.91	2,172.67	-553.76] No. 5 landslide
1,300~1,350	1,650.51	2,196.31	-545.79	
1,250~1,300	1,305.99	1,909.64	-603.65	
1,200~1,250	1,248.25	1,604.77	-356.53	
1,150~1,200	1,264.72	1,479.47	-214.75	
1,100~1,150	1,138.71	1,561.53	-422.82] No. 6 landslide
1,050~1,100	1,517.74	2,033.49	-515.76	
1,000~1,050	1,547.42	1,873.49	-326.07	- No. 7 landslide
950~1,000	1,401.74	1,627.86	-226.12] No. 8 landslide
900~950	1,381.35	1,728.99	-347.64	
850~900	1,159.64	1,449.79	-290.15	
800~850	1,293.20	1,488.02	-194.83	- No. 9 landslide
750~800	1,294.00	1,421.62	-127.62	
700~750	1,190.15	1,230.49	-40.34	- No. 10 landslide
650~700	1,206.98	1,082.48	+124.50	
600~650	1,251.16	1,010.64	+240.52	- No. 11 landslide
550~600	1,198.68	1,006.89	+191.79	- No. 12 landslide
500~550	1,376.48	1,285.51	+90.96	
450~500	1,705.43	1,913.02	-207.58	
400~450	1,766.94	1,769.45	-2.51	
350~400	2,114.43	1,571.30	+543.13	
300~350	2,707.54	1,876.79	+830.75	
250~300	4,637.37	2,602.81	+2,034.56	
200~250	5,026.00	2,874.76	+2,151.23	- Check-dam site
150~200	1,328.37	1,278.94	+49.43	
100~150	1,421.37	1,457.50	-36.13	
50~100	1,448.51	1,449.19	-0.68	
0~50	1,311.11	1,344.67	-33.55	

*All values in the column 'upstream distance' represent the upstream distances from an outlet (i.e., the lowest survey line) of the study reach.
 **Negative(-) and positive(+) values in the column 'stream-bed fluctuation' represent volumes of the eroded and deposited sediment, respectively. In addition, these values include volumes of not only sediment supplied from hillslopes by landslides and from stream-banks by bank erosions but also sediment stored on stream-bed by interaction between stream width and in-stream obstructions.

서 발생하는 토사의 침식 및 퇴적의 양적 변화를 파악하기 위하여 본류 1.95 km 구간을 대상으로 계상변동량을 파악한 결과는 Table 2와 같다. 추정 결과, 39개의 모든 구간에서 계상변동이 발생하였으며, 그 중에서 유역의 하구로부터 150~400 m의 5개 구간, 500~700 m의 4개 구간, 1,600~1,750 m의 3개 구간 및 1,800~1,900 m의 2개 구간에서는 퇴적이, 그 외의 25개 구간에서는 침식이 발생한

것으로 나타났다. 특히, 사방댐이 시공된 200~250 m 구간부터 상류방향으로 250 m 계류구간에서 약 5,557 m³의 토사가 퇴적한 것으로 나타났다. 동일한 산림유역에서 수행된 Seo et al.(2011)의 연구결과에 근거할 때, 나머지 퇴적 구간은 좁은 계곡과 큰 입경의 계상물질(예를 들어 거력이나 유목)의 상호작용에 의해 일시적으로 체류공간이 확보된 것에 기인하는 것으로 추측된다.

Table 3. Sediment budget along the upstream distance of the study reach.

Upstream distance* (m)	Sediment input by landslides (m ³)	Sediment input from upstream** (m ³)	Sediment output to downstream*** (m ³)	Sediment erosion and deposition by disturbance (m ³)
1,900~1,950		0.00	1.14	-1.14
1,850~1,900	225.50	1.14	107.55	+119.09
1,800~1,850		107.55	3.00	+104.54
1,750~1,800		3.00	55.74	-52.73
1,700~1,750	399.62	55.74	390.20	+65.15
1,650~1,700		390.20	174.59	+215.61
1,600~1,650		174.59	83.04	+91.55
1,550~1,600		83.04	183.26	-100.22
1,500~1,550		183.26	333.95	-150.68
1,450~1,500	648.60	333.95	1,318.86	-336.32
1,400~1,450	2,467.38	1,318.86	4,385.25	-599.01
1,350~1,400	656.50	4,385.25	5,595.51	-553.76
1,300~1,350		5,595.51	6,141.30	-545.79
1,250~1,300		6,141.30	6,744.95	-603.65
1,200~1,250		6,744.95	7,101.48	-356.53
1,150~1,200		7,101.48	7,316.22	-214.75
1,100~1,150	3,303.20	7,316.22	11,042.24	-422.82
1,050~1,100		11,042.24	11,558.00	-515.76
1,000~1,050	665.55	11,558.00	12,549.62	-326.07
950~1,000	1,598.63	12,549.62	14,374.36	-226.12
900~950		14,374.36	14,722.00	-347.64
850~900		14,722.00	15,012.15	-290.15
800~850	1,106.64	15,012.15	16,313.62	-194.83
750~800		16,313.62	16,441.24	-127.62
700~750	540.96	16,441.24	17,022.54	-40.34
650~700		17,022.54	16,898.04	+124.50
600~650	1,415.25	16,898.04	18,072.77	+240.52
550~600	1,209.60	18,072.77	19,090.59	+191.79
500~550		19,090.59	18,999.62	+90.96
450~500		18,999.62	19,207.20	-207.58
400~450		19,207.20	19,209.72	-2.51
350~400		19,209.72	18,666.59	+543.13
300~350		18,666.59	17,835.83	+830.75
250~300		17,835.83	15,801.27	+2,034.56
200~250		15,801.27	13,650.04	+2,151.23
150~200		13,650.04	13,600.60	+49.43
100~150		13,600.60	13,636.73	-36.13
50~100		13,636.73	13,637.41	-0.68
0~50		13,637.41	13,670.97	-33.55

*All values in the column 'upstream distance' represent the upstream distances from an outlet (i.e., the lowest survey line) of the study reach.

**Sediment input into study reach was negligible and thus zero was applied in this estimation.

한편, 총 12개소의 산사태지 중 8개소가 700~1,600 m 구간에 집중되어 약 10,988 m³의 토사가 계상으로 유입되었음에도 불구하고 주로 침식이 연속적으로 발생하였다 (Table 2). 특히, 1,400~1,500 m 구간부터 다량의 침식이 발생한 것으로 나타났는데, 이 구간에는 총 12개의 산사태지 중에서 두 번째로 많은 2,467 m³의 토사(1,430~1,470 m 지점)와 일곱 번째로 많은 649 m³의 토사(1,475~1,490 m

지점)를 유입시킨 산사태지가 연결하고 있다.

3. 산지교란 시 계류 구간별 토사유출

전술한 토사의 침식 및 퇴적의 양적 변화로부터 계류구간별 토사유출을 추정된 결과는 Table 3과 같다. 토사유출량 역시 대규모 침식이 진행되기 시작한 1,400~1,500 m 구간부터 급증하는 경향이 나타났으며, 사방댐이 시공된 유

Table 4. Differences in stream-bed fluctuation and gradient after disturbance in the stream section within 250 m right upper area of check-dam.

Upstream distance* (m)	Stream-bed fluctuation** (m ³)		Stream-bed gradient (%)	
	Difference between pre- and post-disturbance	Difference during two years after disturbance	Immediately after disturbance	Two years after disturbance
400~450	-2.51	-280.55	4	6
350~400	+543.13	-511.47	5	8
300~350	+830.75	-778.89	6	7
250~300	+2,034.56	-1,523.40	5	3
200~250	+2,151.23	-902.11	6	3
Sum	+5,557.17	-3,996.42		

*All values in the column ‘upstream distance’ represent the upstream distances from an outlet (i.e., the lowest survey line) of the study reach.

**Negative(-) and positive(+) values in the column ‘stream-bed fluctuation’ represent volumes of the eroded and deposited sediment, respectively. In addition, these values include volumes of not only sediment supplied from hillslopes by landslides and from stream-banks by bank erosions but also sediment stored on stream-bed by interaction between stream width and in-stream obstructions.

역 하구의 200~250 m 구간부터 400~450 m 구간까지의 약 250 m 길이의 구간에서 크게 감소하는 경향이 나타났다.

한편, 산사태로 인하여 계류로 유입된 총토사량(14,237 m³)에 비해, 산사태 연결구간 중에서 최하류인 550~600 m 구간에서의 총 토사유출량(19,091 m³)이 상대적으로 더 많은 것으로 나타났는데(Table 1과 3), 이는 과거 장기간에 걸쳐 계상에 축적되어 있던 불안정한 계상재료가 산사태 발생 시에 계류로 새롭게 유입된 토사들과 함께 유출되었다는 것을 단적으로 증명한다고 할 수 있다.

4. 산지교란 후 사방댐 저사구간에서의 토사 침식

산지교란이 발생한 이후에 사방댐 상류 0.5 km 계류구간 중 약 5,557 m³의 토사가 퇴적한 250 m 계류구간을 대상으로 계상변동량을 파악한 결과는 Table 4와 같다. 산지교란이 발생한 직후 대상 계류구간의 계상경사는 전체적으로 4~6%로 나타난 반면, 산지교란 발생 후 2년이 경과한 2008년 10월 8일에는 동일한 250 m 구간 중 하류

100 m 구간과 상류 150 m 구간의 계상경사가 각각 3%와 6~8%로 나타났다. 또한, 많은 양의 토사가 퇴적된 산지교란 직후와 달리 2008년에는 오히려 약 3,996 m³의 토사가 침식된 것으로 나타났다.

고 찰

불투과형 사방댐의 일반적인 토사 유출 억제와 조절 기능을 이미지화하면 Figure 2와 같다. 그림에서 (i)계획평형 기울기는 평상시의 토사유출에 의하여 퇴적하는 퇴사면의 기울기를, (ii)계획홍수기울기는 홍수(토석)류를 확실하게 포착할 수 있는 퇴사면의 기울기로 홍수(토석)류 발생 이후에는 유수의 작용에 의하여 점차 완만해지는 기울기를 각각 의미한다. 일본에서는 인근 지역에 위치한 기존 사방댐에서의 실측치를 토대로 하여 계획평형기울기를 원 계상기울기의 1/2 이하, 계획홍수기울기를 원 계상기울기의 2/3 이하로 하는 것을 기본으로 하고 있으며, 이는 계

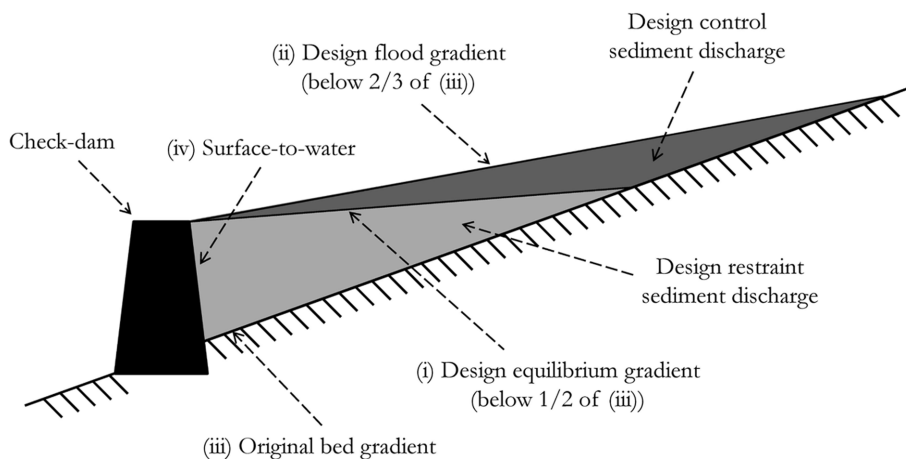


Figure 2. A generalized conceptual diagram representing sediment restrained and controlled by check-dam construction in mountain streams (modified by Chun (2011)).

상구성물질의 형상, 입경 및 유량 등을 고려하여 가장 안정된 구간의 기울기를 참고로 결정하고 있다(e.g., Crisis-Management Division in Hiroshima Prefecture, 2012; Erosion Control Division in Tottori Prefecture, 2014). 또한, (i)와 함께 사방댐 시공 전의 (iii)원 계상기울기, (iv)사방댐 본체의 대수면, 이상의 세 변이 이루는 공간에 의하여 계획억제토사량(토사유출 억제량)이 결정되며, 동일하게 (i), (ii) 및 (iii)의 세 변이 이루는 공간에 의하여 홍수(토석)류 발생 이후에 조금씩 유출되는 계획조절토사량(토사유출 조절량)이 결정된다.

연구대상유역에서 산발적으로 발생한 산사태는 막대한 양의 토사를 계류로 유입시켰으며(Table 1), 유입된 토사들은 과거 장기간에 걸쳐 계상에 축적되어 있던 토사들과 함께 동시다발적으로 발생한 산사태에 의해 야기된 토석류의 영향으로 최초의 유입지점이 아닌 하류지역으로 유출되는 경향이 나타났다(Table 3). 이러한 산지교란 발생 직후 사방댐으로부터 상류 250 m까지의 계상기울기는 4~6%로, 이 구간에 유역 전체의 총 퇴적량인 6,853 m³의 약 81%에 달하는 5,557 m³의 토사가 퇴적하였다(Table 2 와 4). 따라서 사방댐 시공지점의 직하류 구간인 150~200 m 구간의 계상기울기인 9%를 사방댐 시공 이전의 원 계상기울기라고 가정할 때, 대상유역의 사방댐에 의한 계획홍수기울기는 원 계상기울기의 2/3인 약 6% 이하로 나타나 해당 사방댐에 의한 유출조절 토사가 점유하는 구간의 길이는 250 m에 달하는 것으로 추정되었다. 이를 검증하기 위하여 산지교란 발생 후 2년이 경과한 2008년에 수행한 정점측량 결과, 사방댐 직상류의 100 m 구간의 계상경사는 3%로 나타나 산지교란 직후에 비해 완만해졌으며, 보다 상류의 150 m 구간은 6~8%로 나타나 산지교란 직후에 비해 급해진 것으로 나타났다(Table 4). 이는 사방댐에 의한 유출조절 토사의 상당량이 하류로 유출되어 계획홍수기울기가 계획평형기울기에 가까워짐으로써 계획조절토사량을 결정하는 한 변인 원 계상이 드러났기 때문으로 판단된다.

한편, 국내의 불투과형 콘크리트사방댐 설계자들을 대상으로 한 청취조사에 의하면, 원 계상기울기에 대한 정량적 평가 없이 2~3% 정도의 계획평형기울기와 5~7% 정도의 계획홍수기울기를 경험적으로 설계에 반영하고 있으며, 이렇게 설정된 계획평형기울기 이하의 면적, 즉 계획억제토사량에 해당하는 면적을 저사량으로 통칭하고 있었다. 따라서 해당 사방댐의 계획억제토사량은 2,111 m³이 되며, 이 중 약 30% 정도가 2006년도의 산지교란이 발생하기 이전에 퇴적된 것으로 파악되었다. 그러나 이는 방수로 천단으로부터의 여유고를 기준으로 한 값으로, 현 시점에서는 사방댐 직상부의 유출억제 토사가 점유하고 있는 구간의 원지반 형상을 구체적으로 파악할 수 없기 때문에 해당 구

간에서의 산지교란에 의한 실제 유출토사 억제량 변화를 정확히 해석할 수 없었다. 다만, 250 m의 계획조절토사량을 위한 구간에서의 총 퇴적량이 5,557 m³임을 고려할 때, 산지교란 직후의 만사된 사방댐에 의해 조절된 유출토사량은 적어도 3,446 m³ 이상(구간 총 퇴적량 5,557 m³에서 계획억제토사량 2,111 m³을 제함), 즉 계획억제토사량의 1.6 배 이상으로 간주할 수 있을 것이다. 산지교란 발생 후 2년이 경과한 2008년에 수행한 정점측량 결과(Table 4), 이 250 m 구간에서 산지교란 직후부터 2년간 침식된 토사량이 약 3,996 m³에 달하는 것으로 나타나 연구대상유역의 사방댐이 유출토사 억제 능력 이상의 유출토사 조절 능력을 지니고 있다는 것을 증명하고 있다.

결론 및 제언

이상에서 본 바와 같이 사방댐의 토사유출 조절 기능은 토사유출 억제 기능과 구분하여 평가하여야 하지만, 우리나라의 현행 사방댐 설계, 시공 및 유지관리와 연관된 기준 및 매뉴얼 등에는 계획평형기울기, 계획홍수기울기, 계획억제토사량, 계획조절토사량 등의 정의가 명확치 않으며, 주로 ‘저사선’, ‘저사량’, ‘저사고’라는 용어들이 매우 광의적·중의적으로 사용되고 있다. 우선 「사방사업의 설계·시공 세부기준(Korea Forest Service, 2015a)」에는 ‘사방댐의 상류측에 형성되는 저사선의 기울기는 현재의 계류바닥 기울기의 1/2~2/3 내외가 되도록 함을 원칙으로 하되, 유역인자(토석의 크기와 유역면적)에 의한 계획기울기 추정치를 적용한다’라고 되어 있다. 이는 사방댐의 대상지 선정 혹은 규모 결정 등에 있어서 계획평형기울기와 계획홍수기울기를 구분하여 적용하지 않고 있으며, 나아가 이 연구의 결과와 같이 계획억제토사량보다 클 수도 있는 계획조절토사량의 확보에 관한 객관적 근거는 아직까지 마련되어 있지 않음을 보여준다.

또한, 「사방시설의 유지관리 매뉴얼(Korea Forest Service, 2015b)」에 포함되어 있는 「사방댐 준설 평가인자 현지조사 요령」에서도 저사량을 결정하기 위하여 사방댐의 유효고에 대한 ‘사방댐 대수면에 퇴적된 높이를 조사한다’라고 명시하고 있으며, 이를 만사상태에 이른 사방댐의 준설 여부를 판단하는 주요인자로 제시하고 있다. 그러나 이 역시 계획억제토사량과 계획조절토사량의 구분을 전제로 하지 않기 때문에 계획억제토사량에만 해당하는 양을 대상으로 하고 있다고 할 수 있으며, 이는 유출토사의 실질적인 조절능력을 평가하는 데에는 분명 한계가 있을 것으로 판단된다. 예를 들어 이 연구의 대상유역에 위치한 사방댐과 같이 유출토사의 억제능력 이상으로 조절능력이 큰 사방댐을 준설할 경우, 준설작업에 의해 확보된 공간은 중·소규모의 홍수류에 의해서도 계획토사조절 구간을

구성하던 무해(無害)한 토사들에 의하여 비교적 단기간에 걸쳐 매몰되기 때문에 추후에 발생할 대규모 홍수(토석)류를 포착할 수 없게 된다. 따라서 만사상태에 이른 사방댐을 준설할 때에는 반드시 계획토사조절량에 대한 평가가 이루어져야 하며, 이를 근거로 하여 준설의 실시여부, 필요에 따라서는 그 규모 및 빈도를 결정하여야 할 것이다.

그럼에도 불구하고 이러한 사방댐의 토사유출 조절기능을 정량적으로 해석할 수 있는 자료의 축적은 산지교란이 발생하는 시기나 규모가 매우 불규칙적이라는 이유로 지금까지 이루어지지 않았다. 이는 사방댐의 설계, 시공 및 유지관리와 관련된 세부기준과 사방댐의 효과 추정에 필요한 과학적 근거를 제시하지 못한 결과를 초래하였다. 따라서 이 연구의 결과는 당면과제를 해결하기 위한 초석이라 판단하며, 결국 우리 사방기술을 보다 객관적이고도 체계적인 면모를 갖춘 과학적 기술로 발전시키기 위한 구체적인 방안 중 하나가 될 것으로 기대한다.

감사의 글

현장자료의 수집과 정리에 도움을 준 강원대학교 산림환경과학대학 산림자원학과 사방공학연구실 대학원생 여러분들께 진심으로 감사드립니다. 더불어 이 논문의 질적 향상에 도움을 주신 국립산림과학원 이창우 연구관과 사방협회 김민식 연구실장께도 감사의 말씀을 전합니다. 이 논문은 2013년도 공주대학교 신입교수 정착연구비에 의하여 연구되었습니다.

References

- Chun, K.W. 2011. New Erosion Control Engineering. Hyangmunsa. Seoul, Korea. pp. 427. (in Korean)
- Chun, K.W. 2012. A Handbook for Design of Steel Erosion Control Structures. Jisikgonggam. Seoul, Korea. pp. 308. (in Korean)
- Crisis-Management Division in Hiroshima Prefecture. 2012. Technical Guideline for Erosion Control. (<https://www.pref.hiroshima.lg.jp/soshiki/100/>). (in Japanese)
- Lee, S.H. 2015. Applicability of the GIUH model to estimate design flood for erosion control dams. Ph.D. thesis, Seoul National University. pp. 152. (in Korean with English abstract)
- Erosion Control Division in Tottori Prefecture. 2014. Technical Guideline for Erosion Control. (<http://www.pref.tottori.lg.jp/196175.htm>). (in Japanese)
- Japan River Association. 2002a. Technical Criteria for River Works: Practical Guide for Designing [I]. Sankaido. Tokyo, Japan. pp. 251. (in Japanese)
- Japan River Association. 2002b. Technical Criteria for River Works: Practical Guide for Designing [II]. Sankaido. Tokyo, Japan. pp. 218. (in Japanese)
- Kim, K.N. 2011. A basic study on the development of the guidelines on setting debris flow hazards. Research report of Research Institute for Gangwon. Chuncheon, Korea. pp. 170. (in Korean)
- Kim, S.W., Chun, K.W., Kim, J.H., Kim, M.S., and Kim, M.S. 2012. Characteristics of heavy rainfall for landslide-triggering in 2011. Journal of Korean Forest Society 101(1): 28-35. (in Korean with English abstract)
- Korea Forest Service. 2007. The History of 100 Years of Erosion Control Works in Korea. Korea Forest Service. Daejeon, Korea. pp. 838. (in Korean)
- Korea Forest Service. 2015a. Detailed Standards of Designing and Building for Erosion Control Works. Korea Forest Service. Daejeon, Korea. pp. 34. (in Korean)
- Korea Forest Service. 2015b. Maintenance and Management Manual for Erosion Control Facilities. Korea Forest Service. Daejeon, Korea. pp. 44. (in Korean)
- Nakamura, F., Swanson, F.J., and Wondzell, S.M. 2000. Disturbance regimes of stream and riparian systems: a disturbance-cascade perspective. Hydrological Processes 14: 2849-2860. DOI:10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<2849::AID-HYP123>3.0.CO;2-X.
- Nakamura, F., Shin, N., and Inahara, S. 2007. Shifting mosaic in maintaining diversity of floodplain tree species in the northern temperate zone of Japan. Forest Ecology and Management 241: 28-38. DOI:10.1016/j.foreco.2006.12.022.
- Nakamura, F., Seo, J.I., Akasaka, T., and Yabuhara, Y. 2015. Export of large wood and sediment at watershed scale, and predicted future changes of river and riparian ecosystems in Japan. Proceedings of the Third International Conference 'Wood in World Rivers 2015':67-69.
- Park, B., Jun, S., Um, J., Cho, K., and Yoo, N. 2013. Characteristic analysis of dredging and sedimentation debris control facilities in Inje, Gangwon. Journal of the Korean Geo-Environmental Society 14(1): 15-22. (in Korean with English abstract)
- Seo, J., Woo, C., Lee, C., Kim, K., and Lee, H. 2014. Topographical changes in torrential stream after dredging in erosion control dam: using terrestrial LiDAR data. Journal of Korean Forest Society 103(3): 392-401. (in Korean with English abstract)
- Seo, J.I., Chun, K.W., Kim, M.S., Yeom, K.J., Lee, J.H., and Kimura, M. 2011. Longitudinal pattern of large wood distribution in mountain streams. Journal of Korean Forest Society 100(1): 52-61. (in Korean with English abstract)