

Magnitude and Frequency of Debris-flows Controlling the Storage Pattern on the Flat-board Debris-flow Breaker

Jin Hak Kim^{1#}, Kun Woo Chun²⁺, Jung Il Seo¹⁺, Suk Woo Kim², Ju Ung Yun³, Kye Won Jun⁴

¹ Department of Forest Resources, College of Industrial Sciences, Kongju National University, 54 Daehak-ro, Yesan, Chungcheongnam-do, Korea

² Department of Forest Resources, College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University, 1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon, Gangwon-do, Korea

³ National Park Research Institute, Korea National Park Service, 171 Dangu-ro, Wonju, Gangwon-do, Korea

⁴ Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University, 346 Joongang-ro, Samcheok, Gangwon-do, Korea

Abstract

To examine change in storage pattern by magnitude and frequency of debris flows on the flat-board debris-flow breaker (FDB) equipped with side screen and to derive design criteria for a longitudinal length of FDB, we surveyed the amount and grain-size of bed-materials stored by 10-cm distance on the upper surface of FDB using an experimental flume. The results showed that, on the upper surface of FDB, large-sized materials composing storage peak were moved to downstream with increasing volume of supplied bed-materials due to their increasing transport velocity and kinetic energy, thereby increasing total exported volume. In addition, its slit apertures were reduced by the bed-materials stored previously. Therefore, the bed-materials supplied secondarily destroyed and overpassed the peak formed previously, due to the limitation of the FDB length.

Key words: debris flows, experimental flume, designed sediment discharge, magnitude of debris flows, frequency of debris flows

1. 서론

동아시아 지역에서 발생하는 토석류는 발생규모 및 원인에 따라 크게 ① 대규모 산사태 원인형, ② 소규모 산사태 원인형, ③ 다수의 소규모 산사태 원인형, 그리고 ④ 계류에 퇴적된 토석 원인형으로 분류할 수 있다 (Jun, *et. al.*, 2012). 또한, 토석류는 발생 형태에 따라

㉠ 계곡을 따라 이동하는 계곡형 토석류(channelized debris flow)와 ㉡ 사면에서 발생하여 하부로 이동하는 사면형 토석류(open slope debris flow)로 구분되며 (Schuster & Krizek, 1978; Jakob, 2005), 특히 계곡형 토석류는 계곡을 따라 장거리를 이동하는 과정에서 이동경로의 주변부에 형성되어 있는 계안퇴적지의 표층부를 파괴시킴으로써 그 규모가 점차 증가하게 된다.

The 1st author: Jin Hak Kim, Tel. +82-41-330-1314, e-mail, jh-kim@kangwon.ac.kr

+ Corresponding author: Kun Woo Chun, Tel. +82-33-250-8313, e-mail, kwchun@kangwon.ac.kr

Jung Il Seo, Tel. +82-41-330-1302, e-mail, jiseo.watershed@gmail.com

따라서 토석류의 규모는 산사태로 대표되는 산지교란의 발생 규모에 의해 크게 영향을 받으며, 동시에 토석류의 형태로 이동하는 거리에 따라서도 좌우된다고 볼 수 있다.

이러한 토석류의 규모는 중력침식을 야기하는 강우의 발생빈도에 의해서도 크게 좌우된다. Seo, *et al.* (2015)은 고강도 강우의 발생빈도가 높은 산림유역에서는 토석류가 빈번히 발생하여 계류 내 퇴적토사량이 적기 때문에 단일 토석류에 의한 유출토사량은 상대적으로 적은 반면(supply-limit), 고강도 강우의 발생빈도가 낮은 산림유역에서는 토석류가 매우 드물게 발생하여 계류 내에 퇴적토사량이 많기 때문에 단일 토석류에 의한 유출토사량은 상대적으로 많다(transport-limit)고 보고한 바 있다.

이와 같이 토석류에 의하여 대규모의 토사이동이 반복적으로 발생될 것으로 예상되는 지역에서는 다양한 유역특성인자(유역면적, 유로길이, 계상물매 및 계획유출토사량)를 고려하여 사방시설의 위치, 형식 및 규모를 결정하여야 한다(Chun, 2011). 또한, 사방시설의 유지관리 상의 용이성을 고려하여 유역특성인자와 더불어 구조물 자체의 특성인자 역시 설계에 반영되어야 한다(Kim, *et al.*, 2011). 특히, 대규모의 토사이동이 예상되는 지역임에도 불구하고 퇴사공간을 확보하기 어려운 지역에서 토석류를 포착하기 위한 사방시설인 바닥스크린은 다음과 같은 설계기준안이 마련되어야 한다.

- (a) 바닥스크린의 부재 순간격(D)은 바닥스크린의 계획지점을 기준으로 상·하류의 계류구간에 존재하는 계상재료의 입경을 고려하여 결정한다.
- (b) 시공 대상 유역의 계류 폭(혹은 사방댐의 댐둑마루 등과 같이 규제된 통수단면의 폭)에 따라 그 폭(W)을 결정한다.
- (c) 시공 대상 유역으로부터의 계획유출토사량을 고려하여 정해진 폭(W)을 갖는 바닥스크린의 길이(L)를 결정한다.
- (d) 바닥스크린의 길이(L)와 계획지점의 계상경사를 고려하여 바닥스크린의 하부높이(H)를 결정한다.

이러한 바닥스크린의 설계기준은 구조물 자체의 시공과 더불어 바닥스크린 본연의 기능을 유지하기 위하여 제석을 반드시 시행하여야 한다는 유지관리 상에서도 매우 중요한 고려사항이다.

한편, Kim, *et al.* (2016)은 상기의 (a) 설계기준안을 구명하기 위하여 바닥스크린의 순간격에 따른 토석류의 포착효과에 대한 실험을 진행하였다. 그 결과, 계상재료의 평균입경(D_{50})에 해당하는 순간격이 3mm인 바닥스크린이 최적의 토석류 포착효과를 나타낸 반면, 토석류가 바닥스크린에 포착되는 과정에서 토석의 상당량이 측면부로 이탈하는 문제점이 발견되었다. 이러한 바닥스크린의 구조적 문제점을 해결하기 위하여 Kim, *et al.* (2017)은 부재의 순간격이 9mm인 측면스크린을 바닥스크린의 양안부에 부착하여 실험을 진행하였다. 그 결과 토석류의 선단부를 구성하는 큰 입경의 토석들이 측면스크린에 의해 규제된 바닥스크린 상단면부 내에 다량으로 포착되었으며, 결국 바닥스크린의 하단면부로의 토사 투과를 차단하여 바닥스크린 하단면부에서의 퇴적량은 감소하는 긍정적인 효과를 얻었다. 그럼에도 불구하고 Kim, *et al.* (2016)에서 사용된 바닥스크린만을 설치하였을 때에 비하여 총 퇴적량과 총 유출량은 크게 증가하거나 감소하지 않는 것으로 나타났다. 이는 Kim, *et al.* (2016)의 연구에서 사용된 일정한 계상조건 하에서 토석류의 규모에 대한 바닥스크린의 규격이 충분하지 않았기 때문에 발생한 것으로 추정된다. 다시 말하자면 상기의 (c) 설계기준안에 대한 검증의 필요성이 제기되었다고 할 수 있다.

따라서 이 연구에서는 토석류의 발생 규모 및 빈도에 따른 바닥스크린 상단부에서의 토석포착 패턴의 변화를 파악함으로써 바닥스크린의 설계 및 시공기준 정립에 필요한, 특히 바닥스크린의 적정 길이 판정을 위한 기초자료를 제공하는 데에 그 목적을 두고 있다. 우선 Kim, *et al.* (2017)의 연구에서 사용된 바닥스크린, 즉 부재의 순간격이 9mm인 측면스크린을 부착한 순간격 3mm의 바닥스크린을 설치한 모형수로에서 토석류의 발생량 및 발생빈도의 차이를 상정하기 위하여 ①

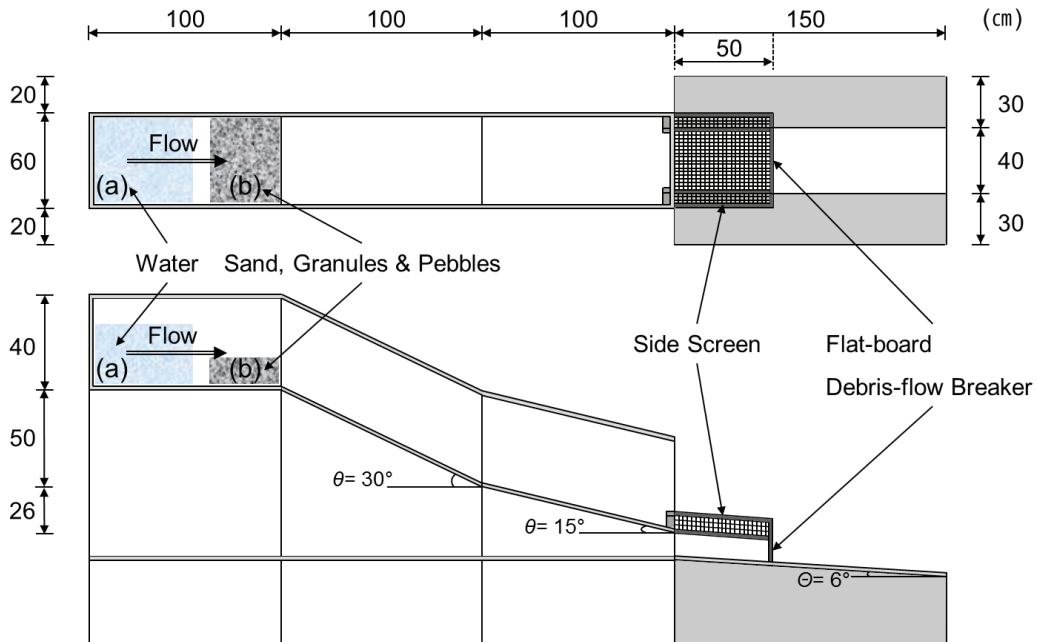


Figure 1. Schematic diagram of the experimental flume used in this study (see also Kim, *et. al.*, 2016)

소규모(9,000g)의 공급재료를 일시에 유하시켰을 경우, ② 대규모(18,000g)의 공급재료를 일시에 유하시켰을 경우, 그리고 ③ 소규모(9,000g)의 공급재료를 2회에 나누어 유하시켰을 경우로 구분하여 실험을 실시하였다. 또한, 관련 선행연구(Kim, *et. al.*, 2016; Kim, *et. al.*, 2017)와는 다르게 이번 연구에서는 바닥스크린의 상단면부에 포착된 토석만을 해석 대상으로 하였으며, 특히 바닥스크린의 상단면부를 상류에서 하류를 향하여 10cm 구간별로 구분하여 포착상황을 해석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 모형수로의 제원

이 실험에 사용한 모형수로의 형상은 Kim, *et. al.*(2016)과 동일하다(Figure 1)). 또한, 모형수로 상에 설치된 바닥스크린은 Kim, *et. al.*(2016)과 Kim, *et. al.*(2017)에서 도출된 공급재료의 평균입경(D_{50})에 해당하는 순간격 3mm의 바닥스크린의 양안부에 공급재료의 최대입경(D_{95})에 해당하는 순간격 9mm의 측면스크린을 부착한 형태이다(Figure 2)).

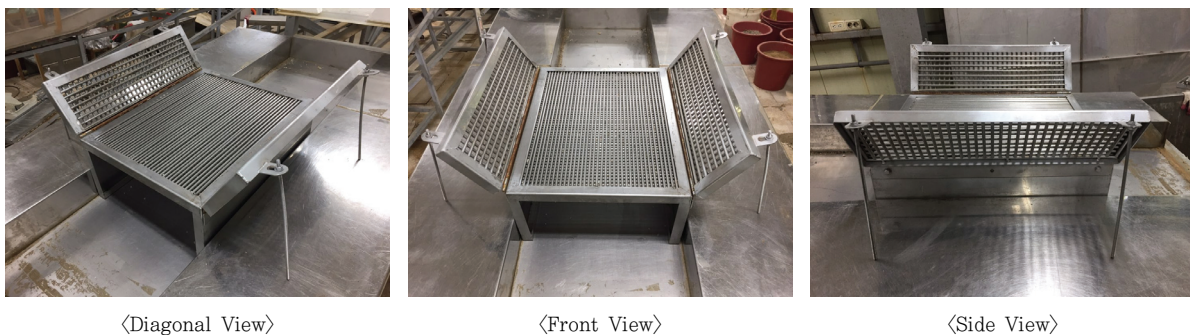


Figure 2. Views of flat-board debris-flow breaker equipped side screens in the experimental flume

The flat-board debris-flow breaker with 3-mm wide slit apertures and the side screens with 9-mm wide slit apertures were applied to the experiment, based on Kim, *et. al.*(2016) and Kim, *et. al.*(2017).

2. 실험조건 및 방법

실험조건은 Kim, *et. al.*(2017)에 의하여 최적의 순간적으로 파악된 3mm 바닥스크린에 9mm 측면스크린을 부착한 경우에 있어서 각각 ① 9,000g의 공급재료를 유하시킨 경우(토석류의 발생량이 소규모일 경우), ② 18,000g의 공급재료를 유하시킨 경우(토석류의 발생량이 대규모일 경우) 및 ③ 9,000g의 공급재료를 먼저 유하시켜 퇴적된 후에 다시 9,000g의 공급재료를 유하시킨 경우(소규모 토석류가 연속으로 발생한 경우)로 구분하여 실험을 실시하였다.

기본적인 실험재료 및 방법은 Kim, *et. al.*(2016)과 동일하다. 특히, 이 연구에서는 과거 토석류 피해가 발생하였던 계류를 대상으로 한 연구결과(Kim, *et. al.*, 2011)에 기초하여 축적 1/90 크기의 수로 및 공급재료를 사용하였으며, 모든 실험은 5회씩 반복하여 그 평균 및 표준편차를 산출하였다. 다만, 바닥스크린 상단면부에서의 퇴적상황을 보다 구체적으로 파악하기 위하여 전술한 바와 같이 50cm 길이의 바닥스크린 상단면부를 10cm 간격으로 구분한 후, 각 구간에 포착된 토석을 수거하여 해석하였다.

3. 통계해석

이 연구에서는 전술한 실험방법에 의하여 정량적

으로 파악한 퇴적토사량, 즉 0~10cm, 10~20cm, 20~30cm, 30~40cm, 40~50cm 구간의 퇴적량 사이의 통계적 차이를 검토하기 위하여 일원분산분석(One-way ANOVA)을 실시한 후, Tukey-HSD의 검정을 실시하였다.

분석에 앞서 이 연구에서 사용된 모든 변수들은 Kolmogorov-Smirnov 검정에 의하여 정규성 검토를 실시하였으며, 모든 통계처리는 SPSS Statistics 21을 이용하였다.

III. 결과

1. 토석의 공급량과 공급빈도의 증가에 따른 유출량 변화

Kim, *et. al.*(2017)의 연구결과에 의하여 최적의 순간적으로 파악된 측면스크린 부착 바닥스크린(바닥스크린의 순간격: 3mm, 측면스크린의 순간격: 9mm)에 있어서 상류로부터 9,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우, 18,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우 및 9,000g의 공급재료를 2회에 걸쳐 유하시켰을 경우의 총 유출량 변화를 비교하였다(Figure 3). 그 결과, 18,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우는 57.9%(10,425g), 그리고 9,000g의 공급재료를 2회에 걸쳐 유하시켰을 경우는

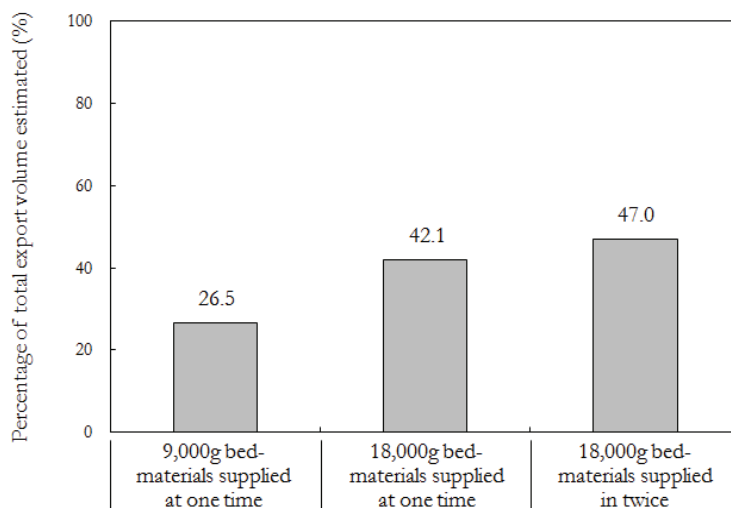


Figure 3. Differences in percentage of total export volume from flat-board debris-flow breaker according to the amount and frequency of bed-materials

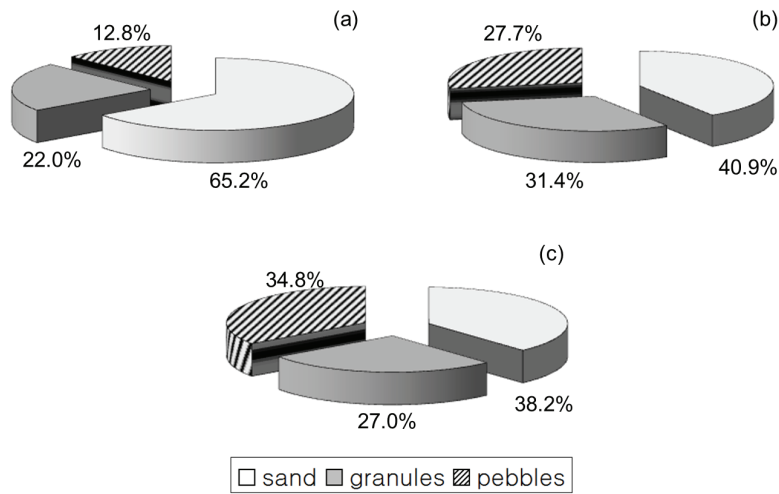


Figure 4. Proportions of each material's exported volume to total supplied volume

- (a) The 9 kg bed-materials were supplied at one time
- (b) The 18 kg bed-materials were supplied at one time
- (c) The 18 kg bed-materials were supplied in twice

53.0%(9,546g)가 평균적으로 포착되는 것으로 나타났으므로, 각각 42.1%(7,575g), 47.0%(8,454g)에 해당하는 공급재료가 평균적으로 유출된 것으로 추정되었다. 이는 9,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우의 평균 포착률 73.5% 및 유출률 26.5%에 비하여 상대적으로 포착효과가 저감된 것을 의미한다.

한편, 바닥스크린의 설치구간을 통과하여 하류구간으로 유출된 공급재료의 입경조성을 파악한 결과는 <Figure 4>와 같다. 우선 9,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우에 있어서 하류로 유출된 공급재료의 입경조성을 파악한 결과, sand, granule 및 pebble의 평균 구성비는 각각 65.2%, 22.0% 및 12.8%로, 입경이 작은 공급재료를 중심으로 하류로 유출되었다. 그러나 18,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우와 9,000g의 공급재료를 2회에 걸쳐 유하시켰을 경우에 있어서 하류로 유출된 공급재료의 sand, granule 및 pebble의 평균 구성비는 각각 40.9%, 31.4% 및 27.7%, 그리고 38.2%, 27.0% 및 34.8%로, 공급재료의 양이 두 배로 증가하거나(9,000g → 18,000g) 혹은 공급재료의 공급횟수를 두 배로 증가할 경우(9,000g 1회 → 9,000g 2회) 입경이 작은 공급재료의 유출은 대폭 억제되었지

만, 상대적으로 입경이 큰 공급재료는 그 유출량이 증가하였다. 또한, 동일한 양의 공급재료를 한 번에 흘렸을 때와 나누어 흘렸을 때(18,000g 1회 → 9,000g 2회)에도 변화의 폭은 다소 미약한 것으로 나타났지만, 앞선 두 경우와 마찬가지로 입경이 큰 공급재료의 유출이 증가하였다.

2. 토석의 공급량과 공급빈도의 증가에 따른 바닥스크린 상단면부에서의 포착량 변화

상류로부터 9,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우, 18,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우 및 9,000g의 공급재료를 2회에 걸쳐 유하시켰을 경우에 있어서 바닥스크린 상단면부에서의 포착량 변화는 <Figure 5>와 같다. 우선 상류로부터 9,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우, 전체 공급량의 64.4%에 해당하는 5,797g이 바닥스크린의 상단면부에 퇴적된 것으로 나타났지만, 18,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우 및 9,000g의 공급재료를 2회에 걸쳐 유하시켰을 경우에는 각각 51.1%(9,196g) 및 45.4%(8,172g)로 나타나 9,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우보다 포착량이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 공급재료의 양을 2배 증가시

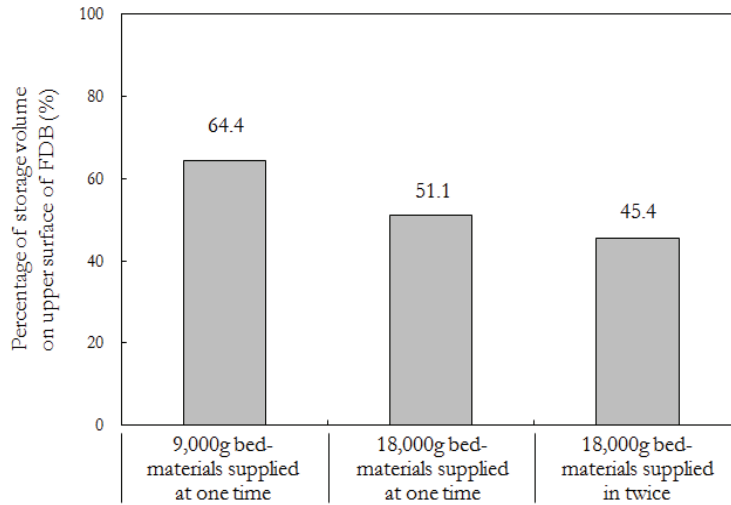


Figure 5. Differences in percentage of storage volume on the upper surface of flat-board debris-flow breaker according to the amount and frequency of bed-materials

켜 1회에 유하시켰을 때(9,000g → 18,000g)와 2회에 걸쳐 유하시켰을 때(9,000g 1회 → 9,000g 2회), 그리고 동일한 양의 공급재료를 한 번에 흘렸을 때와 나누어 흘렸을 때(18,000g 1회 → 9,000g 2회) 모두 바닥스크린의 상단면부에 포착되는 양이 감소하는 것을 알 수 있었다.

한편, 하류로 유출되지 않고 바닥스크린의 상단면부에 포착된 공급재료의 입경조성을 파악한 결과는

〈Figure 6〉과 같다. 우선 상류로부터 9,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우에 있어서 바닥스크린의 상단면부에 포착된 sand, granule 및 pebble의 평균 구성비는 각각 20.8%, 36.7% 및 42.5%로 나타났으며, 18,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우에 있어서는 각각 26.1%, 34.7% 및 39.2%, 그리고 9,000g의 공급재료를 2회에 걸쳐 유하시켰을 경우에는 각각 28.3%, 38.2% 및 33.5%로 나타났다(〈Figure 6〉). 즉, 공급재

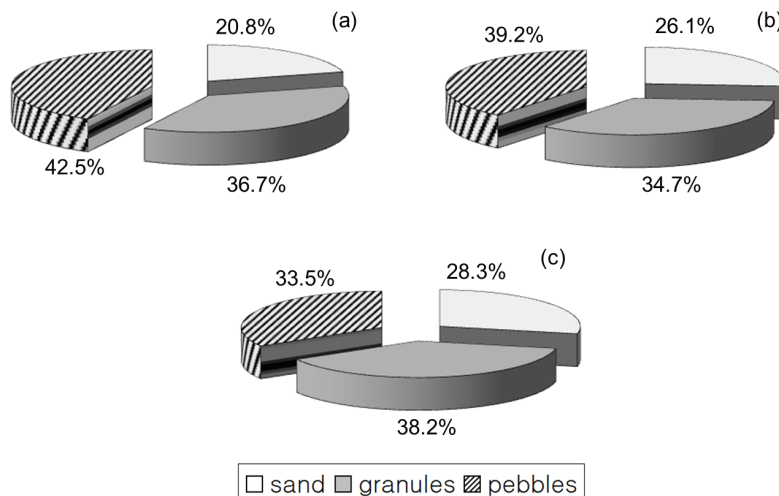


Figure 6. Proportions of each material's stored volume to total stored volume on the upper surface of flat-board debris-flow breaker

- (a) The 9 kg bed-materials were supplied at one time
- (b) The 18 kg bed-materials were supplied at one time
- (c) The 18 kg bed-materials were supplied in twice

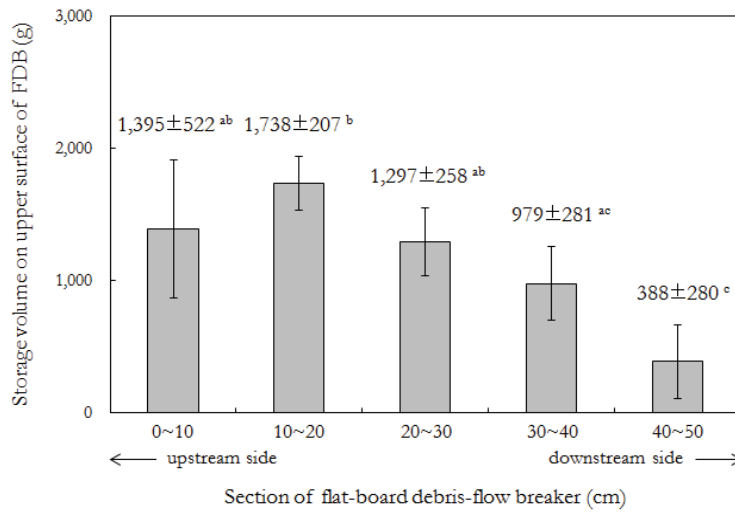


Figure 7. Differences in storage volume in each 10 cm-section on upper surface of flat-board debris-flow breaker when the 9 kg bed-materials were supplied at one time

료의 공급량을 두 배로 증가시켰을 때(9,000g → 18,000g), 공급재료의 공급횟수를 두 배로 증가시켰을 때(9,000g 1회 → 9,000g 2회), 그리고 동일한 양의 공급재료를 한 번에 흘렸을 때와 나누어 흘렸을 때 (18,000g 1회 → 9,000g 2회) 모두 포착된 공급재료의 평균입경이 작아지는 경향이 나타났다.

3. 토석의 공급량과 공급횟수 증가에 따른 바닥스크린 상단면부에서의 토석 포착 형태의 변화
이상과 같은 포착량의 변화를 보다 구체적으로 파악

하기 위하여 바닥스크린의 상단면부에 포착된 토석포착률을 10cm 구간별로 분석한 결과는 <Figure 7>, <Figure 8> 및 <Figure 9>와 같다. 즉, 포착률이 가장 높은 9,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우에 있어서 바닥스크린 상단면부의 10cm 간격별 평균 퇴적량은 0~10cm 1,395g(15.5%), 10~20cm 1,738g(19.3%), 20~30cm 1,297g(14.4%), 30~40cm 979g(10.9%) 및 40~50cm 388g(4.3%)으로, 10~20cm 구간에서 피크 포착률이 가장 높은 '역 V' 형태의 분포가 나타났다 (<Figure 7>).

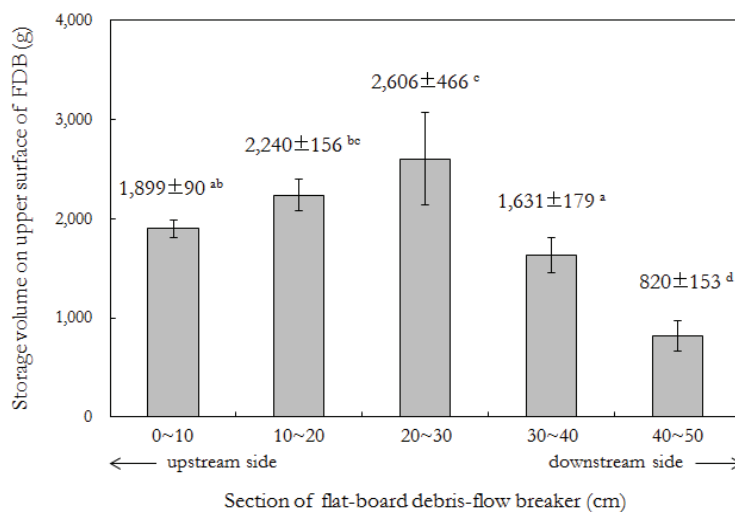


Figure 8. Differences in storage volume in each 10 cm-section on upper surface of flat-board debris-flow breaker when the 18 kg bed-materials were supplied at one time

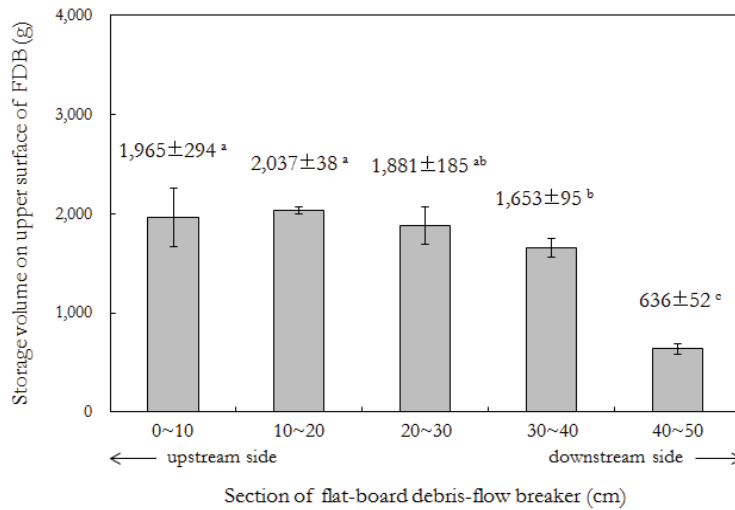


Figure 9. Differences in storage volume in each 10 cm-section on upper surface of flat-board debris-flow breaker when the 18 kg bed-materials were supplied in twice

또한, 공급량을 두 배로 증가시켜 18,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우, 바닥스크린 상단면부의 10cm 간격별 평균 퇴적량은 상류에서부터 하류방향으로 각각 1,899g(10.6%), 2,240g(12.4%), 2,606g(14.5%), 1,631g(9.1%) 및 820g(4.6%)으로, 9,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우에 비하여 약 10cm 하류지점으로 이동한 20~30cm 구간에서 피크 포착률이 가장 높은 ‘역 V’자 형태의 분포가 나타났다(Figure 8)).

그러나 9,000g의 공급재료를 2회에 걸쳐 유하시킨 경우, 바닥스크린 상단면부의 10cm 간격별 평균 퇴적량은 상류에서부터 하류방향으로 각각 1,965g(10.9%), 2,037g(11.3%), 1,881g(10.5%), 1,653g(9.2%) 및 636g(3.5%)으로(비록 10~20cm 구간에서 상대적으로 높은 포착률이 나타났지만, 0~40cm 구간까지와 40~50cm 구간이 상이한 ‘ㄱ’자 형의 포착률이 나타났다(Figure 9)).

결과적으로 공급재료의 양을 두 배로 증가시켰을 경우(9,000g → 18,000g) 피크 포착구간이 하류로 이동하였지만, 공급재료의 공급횟수를 2회로 증가시켰을 경우(9,000g 1회 → 9,000g 2회)와 동일한 양의 공급재료를 한 번에 흘렸을 때와 나누어 흘렸을 경우(18,000g 1회 → 9,000g 2회)에는 공급재료의 피크 포착 구간이 나타나지 않은 대신 확산범위가 증가하는 것

으로 나타났다.

이상과 같은 포착량의 질적 변화를 보다 구체적으로 파악하기 위하여 바닥스크린의 상단면부에 포착된 공급재료의 포착률을 10cm 구간별로 그 입경조성을 분석한 결과는 (Figure 10), (Figure 11) 및 (Figure 12)와 같다. 즉, (Figure 10)에서 알 수 있듯이 9,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우에 있어서 바닥스크린의 상단면부 10cm 간격별 sand, granule 및 pebble의 평균 구성비는 각각 0~10cm 구간에서 27.9%, 48.3% 및 23.8%, 10~20cm 구간에서 22.6%, 37.5% 및 39.9%, 20~30cm 구간에서 20.9%, 34.3% 및 44.8%, 30~40cm 구간에서 12.5%, 28.5% 및 59.0%, 그리고 40~50cm 구간에서 9.0%, 21.7% 및 69.3%로 나타났다((Figure 10)).

또한, (Figure 11)에서 알 수 있듯이 18,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우에 있어서 바닥스크린의 상단면부 10cm 간격별 sand, granule 및 pebble의 평균 구성비는 각각 0~10cm 구간에서 34.3%, 42.6% 및 23.1%, 10~20cm 구간에서 34.5%, 37.5% 및 28.0%, 20~30cm 구간에서 22.0%, 36.5% 및 41.5%, 30~40cm 구간에서 16.3%, 25.4% 및 58.3%, 40~50cm 구간에서 16.5%, 21.7% 및 61.8%로 나타났다.

그리고 (Figure 12)에서 알 수 있듯이 9,000g의 공

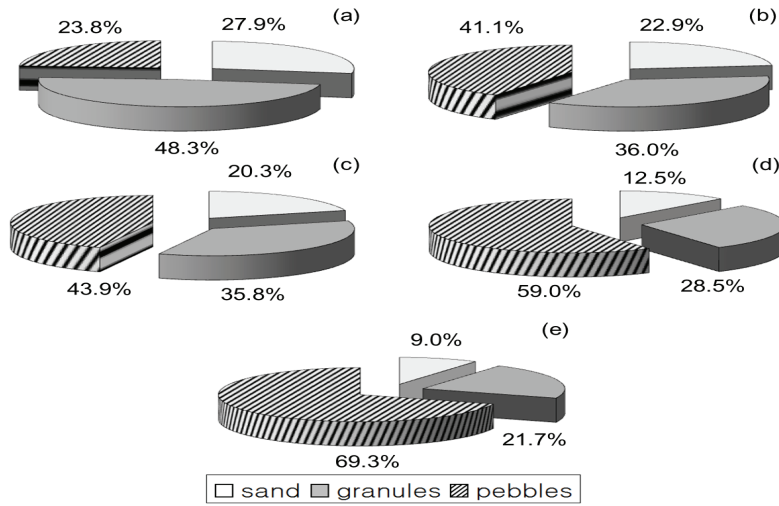


Figure 10. Proportions of each material's stored volume to total stored volume in each 10-cm-section on upper surface of flat-board debris-flow breaker when the 9 kg bed-materials were supplied at one time

급재료를 2회에 걸쳐 유하시켰을 경우에 있어서 바닥스 크린의 상단면부 10cm 간격별 sand, granule 및 pebble의 평균 구성비는 각각 0~10cm 구간에서 33.9%, 43.7% 및 22.4%, 10~20cm 구간에서 29.3%, 43.3% 및 27.4%, 20~30cm 구간에서 30.8%, 36.2% 및 33.0%, 30~40cm 구간에서 24.0%, 33.7% 및 42.3%, 40~50cm 구간에서 11.7%, 19.0% 및 69.3%로 나타났다.

결과적으로 모든 경우에 있어서 공급재료가 바닥스

크린을 이동하는 과정에서 입경의 크기에 따라 이동구간이 변화하는 것으로 확인되었다. 특히, 입경이 가장 큰 pebble의 경우, 9,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우에는 10~20cm 구간에서, 18,000g의 공급재료를 유하시켰을 경우는 20~30cm 구간, 그리고 9,000g의 공급재료를 2회에 걸쳐 유하시켰을 경우에는 40~50cm 구간에서 10%p 이상 증가하는 것으로 나타났다.

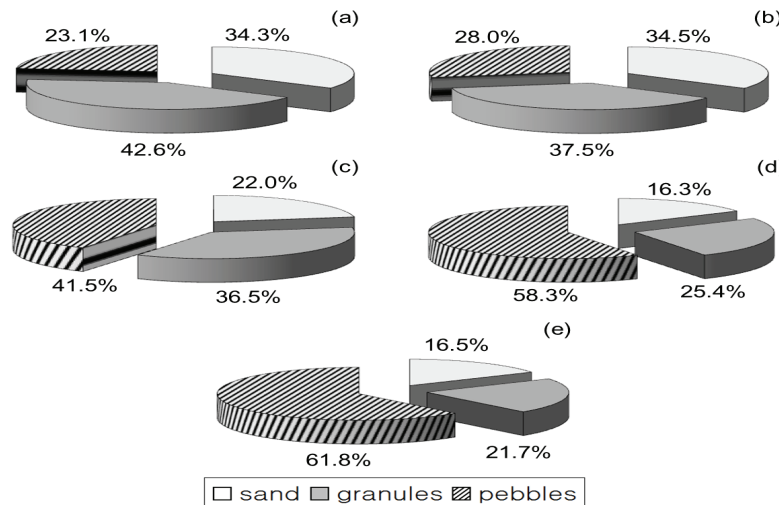


Figure 11. Proportions of each material's stored volume to total stored volume in each 10-cm-section on upper surface of flat-board debris-flow breaker when the 18 kg bed-materials were supplied at one time

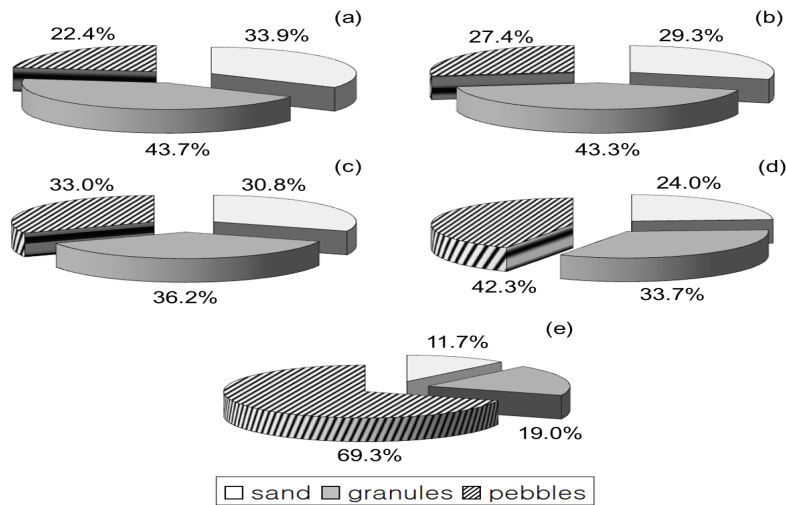


Figure 12. Proportions of each material's stored volume to total stored volume in each 10 cm-section on upper surface of flat-board debris-flow breaker when the 18 kg bed-materials were supplied in twice

IV. 고찰

토석류의 이동특성, 즉 그 규모와 발생 빈도에 따른 측면스크린 부착 바닥스크린의 적정 길이를 파악하기 위하여 계상재료의 공급량을 조절하면서 토석의 포착 효과를 양적·질적으로 검토한 결과, 토석류의 규모가 증가함(공급재료의 양 9,000g → 18,000g)에 따라 바닥스크린의 설치구간을 통과하여 하류로 유출되는 양 역시 증가하는 것으로 나타났으며(〈Figure 3〉), 큰 입径의 계상재료가 그 유출량의 상당부분을 점유하고 있는 것으로 확인되었다(〈Figure 4〉). 특히, Kim, *et. al.*(2017)을 통하여 확인된 측면스크린의 순간격을 계상재료의 최대입경으로, 바닥스크린의 순간격을 계상재료의 평균입경으로 하는 경우에도 토석류의 공급량이 증가되면 계상재료의 포착이 양적·질적으로 저감되는 것으로 나타났다(〈Figure 5〉와 〈Figure 6〉). 따라서 이러한 결과는 이 실험에서 대규모의 토석류로 설정한 공급량의 경우 그 규모, 길이에 제약을 받을 수밖에 없으므로 토석류를 포착하는 데 한계가 있는 것으로 판단되었다.

이러한 판단을 보다 객관화하기 위하여 바닥스크린 상단면부에 포착된 토석류를 10cm 구간별로 분석한 결

과, 토석류의 선단부를 구성하는 큰 입径의 토석이 바닥스크린 상에서 약 10cm 정도 하류방향으로 이동하는 것으로 나타났다(〈Figure 7〉, 〈Figure 8〉, 〈Figure 10〉 및 〈Figure 11〉). Kim, *et. al.*(1998)은 지형특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성에 관한 연구를 통하여 토석류를 구성하는 토석의 양이 증가할수록 그 이동속도가 증가한다고 보고하였다. 따라서 이 실험에서도 이동속도의 증가에 따른 토석류의 운동에너지 증가로 인하여 바닥스크린 상단면부에서 유수가 분리된 이후에도 퇴적토석의 침투부가 이동(9,000g의 공급재료 유하시 10~20cm 구간 → 18,000g의 공급재료 유하시 20~30cm 구간)하였을 것으로 판단된다.

한편, 토석류의 규모와 함께 그 빈도에 따른 바닥스크린의 적정 규모를 파악하기 위하여 계상재료의 공급횟수를 조절하여 바닥스크린에 의한 토석의 포착효과를 양적·질적으로 검토하였다. 그 결과, 소규모 토석류의 발생횟수가 증가한 경우(9,000g의 공급재료 1회 → 2회)는 물론이고, 한 차례의 대규모 토석류와 두 차례의 소규모 토석류가 발생하였을 경우(18,000g의 공급재료 1회 → 9,000g의 공급재료 2회)에도 큰 입径 위주의 공급재료가 다량으로 바닥스크린 설치구간의 하류로 유출된 것으로 나타났다(〈Figure 3〉과 〈Figure 4〉). 특히,

최적의 순간적으로 제작된 바닥스크린인 경우에도 계상 재료의 공급횟수의 증가로 인하여 큰 입경의 토석 포착률이 저감하는 것으로 나타났다(Figure 5)와 (Figure 6)). Kim, *et. al.*(2016)의 결과에서 알 수 있듯이 바닥스크린은 시공 지점 상에서 상류로부터 유입되는 토석류의 유수와 토석을 순간적으로 분리함으로써 토석류의 운동에너지를 급격히 감소시켜 퇴적을 유도하며, 이는 현지를 대상으로 바닥스크린의 효용성을 확인한 선행연구(Kiyono, *et. al.*, 1986; Imai, *et. al.*, 1989)에서도 동일하게 나타났다. 그러나 측면스크린의 부착으로 인하여 측방으로의 흐름이 규제된 상황에서 선행 토석류에 의하여 바닥스크린의 부재 간격이 축소된다면 설계 및 시공 당시에 기대한 유수와 토석의 분리는 이루어지지 않게 될 것이며, 이러한 물리적 조건 하에서 유입되는 후속 토석류는 결국 기존에 퇴적된 토석의 상단면부를 월류하여 유출될 것으로 판단된다.

이러한 기작은 바닥스크린 상단면부의 10cm 구간별 토석류 포착 상황에서도 확인되었다. 즉, 토석류의 발생 횟수가 1회로 제한되었던 경우(공급재료의 양 9,000g 또는 18,000g)에는 토석류의 발생 규모와 상관없이 퇴적토석의 침두부가 명확히 형성되었으며(Figure 7과 8), 이 침두부를 중심으로 입경이 큰 토석이 분포하였다(Figure 10)과 (Figure 11)). 그러나 토석류가 연속적으로 발생(9,000g의 공급재료를 2회 이하)한 경우에는 퇴적토석의 침두부가 형성되지 않았을 뿐만 아니라 그 분포도 역시 0~40cm 범위 내에서 명확하게 나타나지 않았으며(Figure 9)), 40~50cm 구간에서 큰 입경의 토석이 포착되는 것으로 나타났다(Figure 12)). 이와 같은 복수의 토석류 발생에 따른 바닥스크린의 기능 저하는 실제의 산지계류를 대상으로 바닥스크린의 기능을 정량적으로 평가한 Imai, *et. al.*(1989)의 연구에서도 보고되었다.

V. 결론

이 연구에서는 토석류의 이동특성, 즉 그 규모 및 발

생 빈도의 차이에 따른 측면스크린 부착 바닥스크린의 적정 규모를 파악하기 위하여 토석류가 소규모일 경우와 대규모일 경우, 그리고 소규모의 토석류가 연속으로 발생하였을 경우로 구분하여 토석류의 포착효과를 양적·질적으로 파악하였다.

실험 결과, 토석류의 발생량이 증가함에 따라 토석류의 운동에너지가 증가하여 바닥스크린 상단면부에서 유수가 분리된 이후에도 큰 입경의 토석이 다량으로 함유된 퇴적토석의 침두부가 하류지역으로 이동하였다. 또한, 소규모 토석류가 연속으로 발생한 경우에는 선행 토석류에 의하여 바닥스크린의 부재 간격이 축소되어 후속 토석류는 결국 기존에 퇴적된 퇴적토석의 상부를 월류하여 큰 입경의 토석이 다량 함유된 퇴적토석의 침두부가 형성되지 않았다.

따라서 토석류 포착효과를 극대화하기 위해서는 측면스크린을 부착한 바닥스크린의 종단적 규모를 토석류의 규모 및 발생 빈도에 따라 유연하게 결정하여야 할 것으로 판단된다. 이를 위해서는 토석류에 의한 유역내의 잠재적 유출토사량과 토석류 발생 빈도에 관한 정량적 해석이 이루어져야 할 것이며, 이는 생활권 산록지역의 제한된 공간에서의 설계와 구조적 특성 상 필수불가결한 제석 등의 유지관리 방안을 결정하는 데 반드시 해결되어야 할 선결과제라고 할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 산림청 ‘임업기술연구개발사업(과제번호: S111215L050110)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- Chun, Kun Woo. 2011. *New Erosion Control Engineering*. Seoul: Hyangmunsa.
- Imai, Kazuyuki, Noboru Miyamoto, and Takahisa Mizuyama. 1989. Test of a Debris-flow Breaker at the Valley, Mt. Yakedake (Part-2). *International Journal of Erosion Control*

- Engineering*. 42(2): 16-20.
- Jacob, M. 2005. A Size Classification for Debris Flow. *Engineering Geology*. 79: 151-161.
- Jun, Byong Hee, Kye Won Jun, and Chang Deok Jang. 2012. A Study on Development of Debris Flow Experimental Equipment for Mountainous Disaster. *Korean Review of Crisis and Emergency Management*. 8(3): 137-146.
- Kim, Jin Hak, Kun Woo Chun, Jung Il Seo, Suk Woo Kim, Ju Ung Yun, and Kye Won Jun. 2016. An Examination of Optimum Slit Aperture Suited to Flat-board Debris-flow Breaker in Residential Piedmont Areas. *Crisisonomy*. 12(4): 73-83.
- Kim, Jin Hak, Kun Woo Chun, Jung Il Seo, Youn Tae Lee, and Kye Won Jun. 2017. The Effect of Side Screen Attached to Flat-board Debris-flow Breaker on Damage Reduction. *Crisisonomy*. 13(1): 109-121.
- Kim, Man Il, Moon Se Lee, Buhm Soo Chang, Don Seok Bang, and Jong Gun Lee. 2011. Countermeasure and Pending Issue of Facility Standards for Dealing with Debris Flow Hazards. *Proceeding of the Annual Meeting of the Journal of Engineering Geology*. 87-92.
- Kim, Suk Woo, Se Myong Kwon, Kun Woo Chun, and Tsugio Ezaki. 2011. Quantitative and Qualitative Analyses of Channel Bed Fluctuation in a Mountain Stream. *Proceedings of the 2011 Joint Meeting of the Korean Forest Sciences*. 710-711.
- Kim, Won Young, Sa Ro Lee, Kyeong Su Kim, and Byung Gon Chae. 1998. Landslide Types and Susceptibilities Related to Geomorphic Characteristics: Yeonchon-Chulwon Area. *The Journal of Engineering Geology*. 8(2): 115-130.
- Kiyono, Masao, Hidenori Miyakoshi, Shinji Uehara, and Takahisa Mizuyama. 1986. Test of a Debris-flow Braker in Valley Kamikami, Mt. Yake-dake. *International Journal of Erosion Control Engineering*. 39(3): 15-19.
- Schuster, Robert L. and Raymond J. Krizek. 1978. *Landslides, Analysis and Control*. Wasington, D. C.: National Academy of Sciences.
- Seo, Jung Il, Futoshi Nakamura, Kun Woo Chun, Suk Woo Kim, and Gordon E. Grant. 2015. Precipitation Patterns Control the Distribution and Export of Large Wood at the Catchment Scale. *Hydrological Processes*. 29(24): 5044-5057.
- Korean References Translated from the English*
- 김만일, 이문세, 장범수, 방돈석, 이종건. 2011. 국내 토석류재해 대응을 위한 시설기준의 현안 및 대책. 대한지질공학회 학술발표논문집. 87-92.
- 김석우, 권세명, 전근우, 쓰기오에자키(江崎次夫). 2011. 산지계류의 계상변동에 관한 양적·질적 해석. 2011 산림과학 공동학술대회 논문집. 710-711.
- 김원영, 이사로, 김경수, 채병곤. 1998. 지형특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성: 연천-철원지역을 대상으로. 지질공학회지. 8(2): 115-130.
- 김진학, 전근우, 서정일, 김석우, 윤주웅, 전계원. 2016. 생활권 산록지역에 있어서 토석류 피해 저감을 위한 철강재 바닥스크린의 최적 순간격 파악. *Crisisonomy*. 12(4): 73-83.
- 김진학, 전근우, 서정일, 이운태, 전계원. 2017. 철강재 바닥스크린의 토석류 피해저감 기능 극대화를 위한 측면스크린의 부착 효과. *Crisisonomy*. 13(1): 109-121.
- 전근우. 2011. 신고 사방공학. 서울: 향문사.
- 전병희, 전계원, 장창덕. 2012. 산지재해 연구를 위한 토석류 실험장치의 개발 방안. 한국위기관리논집. 8(3): 137-146.
- Japanese References Translated from the English*
- 清野雅雄, 宮越英紀, 上原信司, 水山高久. 1986. 底面水抜きスクリーンの現地試験. 砂防学会誌. 39(3): 15-19.
- 今井一之, 宮本登, 水山高久. 1989. 底面水抜きスクリーンの現地試験(続報). 砂防学会誌. 42(2): 16-20.

Received: Apr. 5, 2017 / Revised: Apr. 17, 2017 / Accepted: Apr. 24, 2017

토석류의 발생 규모 및 빈도에 따른 바닥스크린 상의 토석류 포착 형태의 차이

국문초록 이 연구에서는 모형수로 실험을 통하여 측면스크린이 부착된 바닥스크린 상에서 토석류의 발생 규모 및 빈도에 따른 포착형태의 변화를 파악하고, 그로 인해 바닥스크린의 종단 길이 결정에 필요한 설계기준의 마련을 목적으로 바닥스크린 상에 퇴적된 계상재료의 양과 입경크기를 10cm의 종단구간별로 구분하여 해석하였다. 그 결과, 토석류의 규모가 증가함에 따라 그 이동속도(운동에너지)에 영향을 미쳐 바닥스크린 상단면부에서는 퇴적토석의 침투부를 구성하는 큰 입경의 계상재료가 하류방향으로 이동하는 거리가 증가하였으며, 결국 총 유출량 또한 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 토석류의 발생 빈도가 증가함에 따라 선행 토석류가 바닥스크린의 부재 간격을 축소시켜 후속 토석류가 퇴적토사를 월류한 후 하류로 유출되는 것으로 나타났으며, 그 과정에서 단일 토석류에 의하여 형성되었던 퇴적형태, 특히 침투부의 형태가 변형되는 것으로 나타났다. 이는 바닥스크린 종단규모에 영향을 받은 것으로 판단된다.

주제어 : 토석류, 모형수로, 계획유출토사량, 토석류 규모, 토석류 발생빈도

Profiles **Jin Hak Kim** : He received his Ph.D. degree from Kangwon National University, Korea in 2017. He is a post doctor in the Department of Forest Resources at Kongju National University since 2017. His research interests include debris-flow mechanism, urban erosion control works and related structures, and flume test. He has the published 17 articles in journals (jh-kim@kangwon.ac.kr).

Kun Woo Chun : He received his Ph.D. degree from Hokkaido University, Japan in 1987. He is a professor of the Department of Forest Resources, College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University, in which he has taught since 1987. His interesting subject and area of research and education is erosion control engineering, forest hydrology and revegetation engineering. He has the published 277 articles in journals and the written 22 books (including co-author books) (kwchun@kangwon.ac.kr).

Jung Il Seo : He received his Ph.D. degree with the theme entitled 'Spatial and temporal variations in the fluvial export of large woody debris at the watershed scale' from Hokkaido University, Japan in 2008. He is an assistant professor in the Department of Forest Resources at Kongju National University since 2013. His interests of research and education include the fluvial & non-fluvial processes, channel morphology, riparian dynamics & ecological response, and watershed conservation & restoration. He has the published 50 articles in national/international journals and the written 4 co-author books (jiseo.watershed@gmail.com).

Suk Woo Kim : He received his Ph.D. degree from Hokkaido University, Japan in 2009 (thesis title: Sediment Transport and Morphodynamics in a Mountainous Bedrock Stream). He is a part-time instructor of the Program of Forest Resources, College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University. His interesting subject and area of research and education are rainfall-triggered shallow landslides, geomorphological changes and sediment transport in small mountain streams. He has published 56 articles in journals and written 3 co-author books (secontrol@naver.com).

Ju Ung Yun : He is a researcher in the fields of disaster risk reduction and landslide monitoring at the policy research division in Korea National Park Research Institute of Korea National Park Service. He has also been a Ph.D. student in the Department of Forest Resources, at Kangwon National University since 2014. His research interests include forest wetland, forest hydrology and suspended load transport (juung@knps.or.kr).

Kye Won Jun : He received his Ph.D. degree from Chungbuk National University, Korea in 2004. He is a professor of the Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University, in which he has taught since 2004. His interesting subject and area of research and education are flood prevention, mountainous disaster prevention, and natural disaster prevention & management. He has published 74 articles in journals and written 8 books (including co-author books) (kwjun@kangwon.ac.kr).