

An Examination of Optimum Slit Aperture Suited to Flat-board Debris-flow Breaker in Residential Piedmont Areas

Jin Hak Kim^{1#}, Kun Woo Chun¹⁺, Jung Il Seo²⁺⁺, Suk Woo Kim¹, Ju Ung Yun¹, Kye Won Jun³

¹ Department of Forest Resources, College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University, 1 Kangwondaehakgil, Chuncheon, Gangwondo 24341, Korea

² Department of Forest Resources, College of Industrial Sciences, Kongju National University, 54 Daehakro, Yesan, Chungcheongnamdo 32439, Korea

³ Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University, 346 Joongangro, Samcheok, Gangwondo 25913, Korea

Abstract

This study examines how to derive an optimal slit aperture of flat-board debris-flow breaker (hereafter FDB), which is a new method for reducing damages by debris flows in residential piedmont areas. The results show that FDB divided momentarily debris flows into water and bed-materials, thereby inducing storage of the (especially with large grain-sized) materials and causing potentially huge damages. In addition, with increasing slit aperture, the amount of large grain-sized materials increased under the lower surface of FDB, which reflects inversely that, under the consideration that FDB requires obligatorily dredging works, FDB with the slit aperture equal to mean grain-size of bed-materials is effective for capturing debris flows. However, on the upper surface of FDB with the optimum slit aperture, its considerable amount was dropped out to both sides of FDB. This finding indicates that a pile of the materials formed on the upper surface of FDB changed flow direction of the materials arriving at the heels of the pile.

Key words: debris flows, experimental flume, bed-material, grain-size, dredging work

1. 서론

최근 지구온난화에 따른 이상기후로 강우패턴이 변화하여 국지성 집중호우가 빈발함에 따라 산사태, 토석류 및 유목 등의 산지토사재해가 점차 대형화·빈번화되고 있는 추세이다. 우리나라의 경우, 이와 같은 산지토사재해는 주로 단기간의 집중호우에 의해 발생되고

있으며(Kim, *et. al.*, 1998; Kim, *et. al.*, 2000; Kim, *et. al.*, 2012a), 대표적인 사례로 2011년 7월 26일과 27일에 걸쳐 중부지방을 강타한 집중호우로 인해 서울시 우면산 일대에서 사망 18명과 부상 21명, 강원도 춘천시 마적산 일대에서 사망 13명과 부상 26명의 사상자가 발생하였다(Korea Forest Service, 2012). 특히, 이 들은 산림을 배후지로 하는 생활권 산록지역에서 야기

[#] The 1st author: Jin Hak Kim, Tel. +82-33-250-7311, e-mail, jh-kim@kangwon.ac.kr

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

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

된 토사재해로 인해 인명 및 재산피해가 발생하였다는 점에서 사회적인 문제로 크게 대두되었다.

이러한 토사재해에 의한 피해를 저감하기 위하여 대규모의 토사 이동이 예상되는 지역에 시공하는 사방댐은 시공대상지역의 유역특성을 충분히 고려하면서 계안·계상의 침식방지, 유출토사의 조절, 토석류의 포착 및 감세, 유목의 포착기능 등을 충분히 발휘할 수 있도록 그 위치, 형식 및 규모를 결정하여야 한다(Chun, 2011). 특히, 이미 개발이 진행된 생활권지역에서는 사방시설을 배치할 수 있는 퇴사공간을 확보하기 어려울 뿐만 아니라 형식 및 규모의 측면에 있어서도 경관적 요소로서의 기능을 고려해야만 한다. 따라서 생활권지역에서의 사방사업은 지역의 생활 및 공간적 특성을 고려하여 이미 개발된 지역과 앞으로 개발될 지역으로 구분한 후, 각각의 지역적 조건에 적합한 사방공법을 채택하여야 한다.

한편, 사방의 선진국인 일본과 오스트리아에서는 최근 기존의 중력식 사방댐과 투과형 사방댐의 형태를 접목시킨 바닥스크린이 개발되어 현지에 적용되고 있다. 이 공법은 판자 형태의 강재를 계상과 평행하게 시공함으로써 토석류의 본체로부터 유수를 운동방향의 연직방향으로 분리시켜 토석의 운동에너지를 일시에 저감시키는 매우 유효한 공법이라 할 수 있다(Kiyono, *et. al.*, 1986; Imai, *et. al.*, 1989). 따라서 이 공법은 계상에 연직방향으로 시공되기 때문에 토석과 유수를 진행방향으로 분리하는 형태의 다기능 또는 복합식 사방댐에 비해 구조물 자체에 미칠 수 있는 토석류의 충격력이 적을 것으로 예상된다. 또한, 기시공된 사방댐과 연결하여 시공이 가능하며, 간단한 디자인과 저렴한 시공 및 유지비용 또한 장점이라 할 수 있다(International Center for Water Hazard and Risk Management, 2008).

산지토사재해가 빈번히 발생하고 있는 일본에서는 이러한 바닥스크린의 순기능에 관하여 다수 보고된 바가 있다. Watanabe, *et. al.*(1980)는 바닥스크린을 포함한 9가지 사방시설물의 기능과 효과를 비교하기 위한

모형실험을 통하여 토석류의 피크 토사량 및 유출토사량 감소에 대한 바닥스크린의 순기능을 보고하였으며, Kiyono, *et. al.*(1986)와 Imai, *et. al.*(1989)는 현장에 시공되어 있는 바닥스크린에서 토석류가 유동하는 상황을 VTR로 촬영하여 영상해석과 현장측량 결과로부터 바닥스크린의 기능적 효과를 검증하였다. 또한, 최근에 들어 Gonda(2009)는 바닥스크린의 순간격과 공급재료의 입경차이에 따른 바닥스크린 위에서의 토석 이동상황 변화에 관하여 연구하였으며, Kim, *et. al.*, (2012b)은 모형실험을 통한 바닥스크린의 수치모델에 관한 연구를 수행하였다. 이에 반해 국내에서는 최근에 들어 Kim(2013)이 바닥스크린의 토석류 포착효과에 관한 실험적 연구를 실시하였고, Jung, *et. al.*(2015)이 토사재해 저감 효과의 검증을 위한 바닥스크린을 3D 프린터로 제작한 바가 보고된 정도이다. 다시 말해서 바닥스크린에 의한 토석류 포착효과에 관한 검토는 여전히 초보적인 수준에 머물러 있다고 볼 수 있으며, 이에 대한 충분한 검토는 사방시설물의 시공위치에 따른 형식의 다양화, 특히 생활권에 연접한 산록부에서의 사방시설물 선정의 다각화에도 기여할 수 있을 것이다. 이러한 배경으로부터 이 연구에서는 모형실험을 통하여 바닥스크린의 순간격에 따른 토석류 포착효과를 정량적·정성적으로 파악하였다.

II. 재료 및 방법

1. 모형수로의 개요

실험에 사용한 모형수로의 형상은 <Figure 1>과 같다. 수로의 최상단부에는 길이 100cm, 폭 60cm, 높이 40cm 크기의 수문개폐가 가능한 구조의 저수조를 수평하게 설치하였으며, 이 저수조는 다시 종단방향(유수의 흐름방향)으로 두 구간으로 나누어 후면부(<Figure 1>의 (a))에는 물을, 전면부(<Figure 1>의 (b))에는 실험용 공급재료를 채워 토석류의 선단에 석력이 먼저 유해지는 모습을 재현할 수 있도록 하였다. 이어서 저수조와 동일한 크기의 직선 수로 2개를 종단방향으로 연결

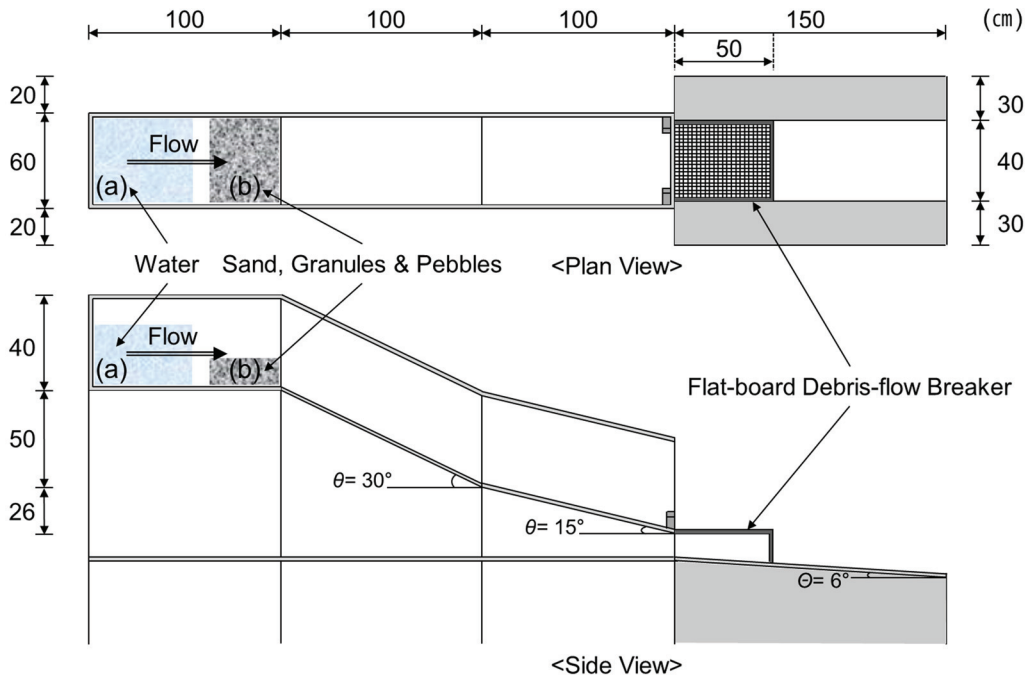


Figure 1. Schematic diagram of the experimental flume

하여 수로의 경사를 조절할 수 있도록 하였으며, 실험 과정을 30fps 단위의 디지털카메라로 촬영할 수 있도록 수로의 측면을 10mm 두께의 투명 아크릴판으로 제작하였다. 특히, 상류수로와 하류수로의 경사를 각각 30°와 15°로 설정하여 토석류의 발생구간과 유하구간을 재현하였다. 하류수로의 하단에는 길이 150cm, 폭 40cm, 높이 10cm의 스테인리스 판을 경사 6°로 설치하여 퇴적구간을 재현하였다. 이 실험에서는 일정속도로 유하구간을 통과한 공급재료가 3가지의 순간격을 갖는 바닥스크린에 의해 각각 어느 정도 포착되는지에 관한 비교만을 목적으로 하고 있기 때문에 수로의 바닥면은 이동상(移動床)이 아닌 고정상(固定床)으로 하였다. 또한, 발생·유하·퇴적구간으로 설정한 30°, 15°, 6°의

모형수로 경사는 통상적인 토석류의 발생·유하·퇴적이 각각 25° 이상, 10~25°, 10° 미만의 범위에서 나타난다는 선행연구(VanDine, 1985; Jun, *et. al.*, 2011; Jun, *et. al.*, 2012)의 결과를 참고하였다.

한편, 바닥스크린은 퇴적구간의 최상류부에 탈부착이 가능하도록 제작하였다. 이 바닥스크린의 제원은 길이 50cm, 폭 40cm 및 높이 20cm로 스테인리스 재질이며, 바닥스크린이 하류수로와 접하는 부분에는 수로의 양안과 밀착되도록 (사방댐의 댐어깨와 동일한 구조의) 바닥스크린 어깨를 10cm 길이로 설치하여 폭 40cm의 방수로를 확보하였다(Figure 2)). 바닥스크린의 높이(20cm)는 방수로 천단과 동일한 높이로, 방수로를 통과하는 토석류가 낙차 없이 바닥스크린의 상부면에 도

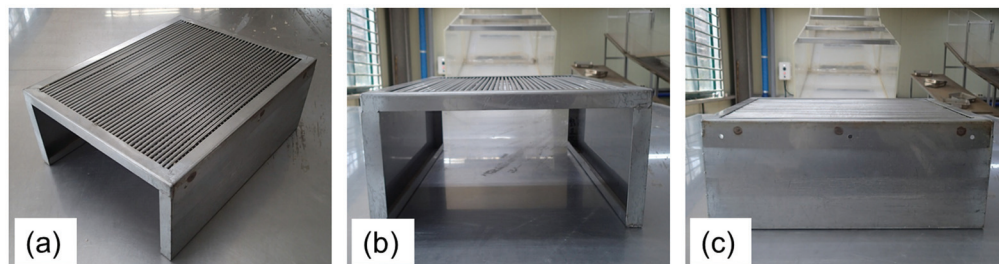


Figure 2. Flat-board debris-flow breaker applied in the experimental flume

(a) Diagonal view, (b) Front view, (c) Side view

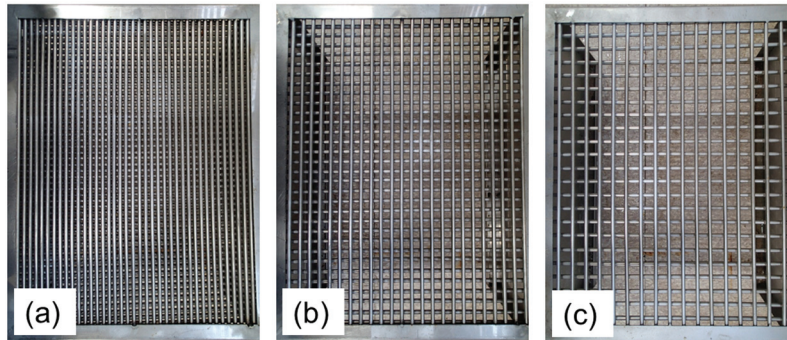


Figure 3. Slit aperture of the flat-board debris-flow breaker
 (a) Slit aperture with 3-mm wide, (b) Slit aperture with 9-mm wide, (c) Slit aperture with 15-mm wide

달하도록 하였다. 바닥스크린의 순간격은 공급재료의 크기를 고려하여 3mm, 9mm 및 15mm로 각각 제작하였다(〈Figure 3〉).

2. 연구방법

모형실험에 사용한 공급재료는 과거 토석류 피해가 발생하였던 계류의 계상퇴적물 조사에 관한 연구결과(Kim, *et. al.*, 2011)를 바탕으로 수로의 규모를 고려하여 축척 1/90 크기의 sand(입경 0.25~2.0mm), granules(입경 2.0~4.0mm) 및 pebbles(입경 4.0~11.0mm)을 흙의 입도시험용 체를 이용하여 구분한 뒤, 각각 3kg씩 혼합하여 자갈부터 거석까지 혼합된 토석류의 구성 재료로 상정하였다(〈Figure 4〉). 이들의 최대입경(D_{95})과 평균입경(D_{50})은 각각 9.49mm와 3.00mm이다(〈Figure 5〉).

이러한 공급재료를 이용하여 ① 바닥스크린을 설치

하지 않는 경우(무시설)와, 순간격이 각각 ② 3mm, ③ 9mm 및 ④ 15mm인 바닥스크린을 설치한 경우, 이상 총 4가지의 경우로 구분하여 실험을 실시하였다. 우선 저수조의 후면부에 물을 충분히 채우고 저수조의 전면부에 공급재료를 부설한 후, 저수조의 수문을 일정 높이만큼 열어 유수와 함께 공급재료가 이동하도록 하였다. 일반적으로 토석류의 이동속도는 20~40km/hr 범위를 나타내는데(Chun, 2011), 이 실험에서는 수로의 측면부에서 촬영한 30fps 단위의 디지털카메라 영상자료를 근거로 공급재료의 선단부가 30° 경사의 발생구간(상류수로)에서 충분히 가속된 후, 15° 경사의 유하구간(하류수로)에서 20km/hr의 이동속도를 유지하도록 하였다.

포착된 공급재료의 양·질적 해석은 바닥스크린 직상류 부분의 바닥스크린의 어깨부에 퇴적된 공급재료와 바닥스크린의 설치구간에 해당하는 50cm 구간에 퇴적된 공급재료를 구분하여 실시하였으며, 이 때 바닥스

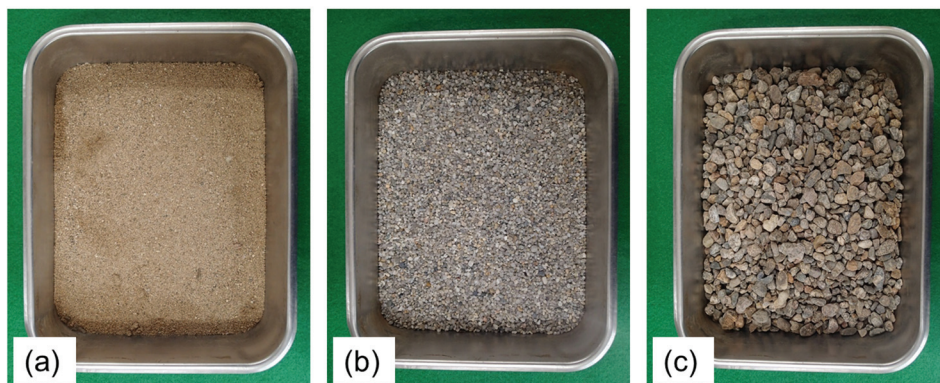


Figure 4. The materials, as main body components of debris flows, supplied to path of the flume
 (a) Sand, (b) Granules, (c) Pebbles

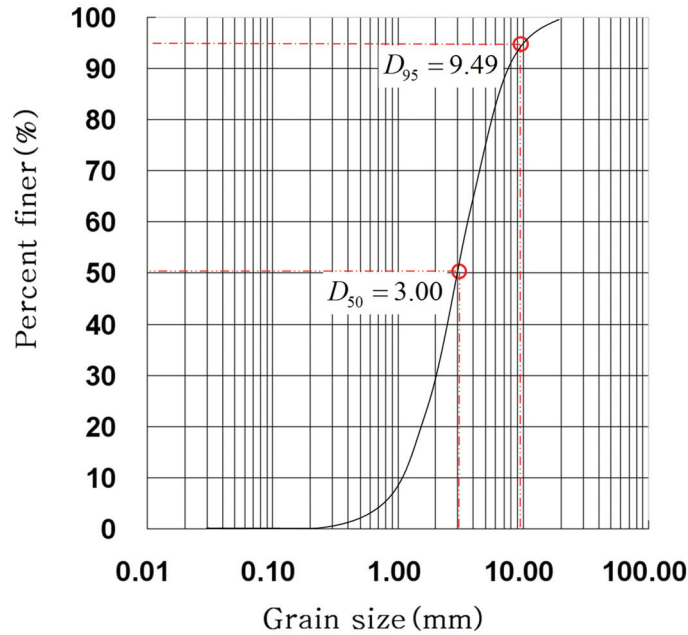


Figure 5. Grain-size distribution of the supplied materials

크린의 어깨부에 퇴적된 공급재료는 바닥스크린의 영향 해석에서 제외하였다. 또한, 바닥스크린의 설치구간에 퇴적된 공급재료는 바닥스크린의 상단면부와 하단면부로 구별하였으며, 더불어 바닥스크린의 양쪽 측면부로 이탈한 공급재료도 별도로 수거하여 해석에 이용하였다.

한편, 각각의 퇴적공간으로부터 수거된 공급재료는 75°C의 건조기에서 48시간 건조시켜 수분을 완전히 제거한 후, 무게 측정 및 입경조성 구분을 실시하였으며, 모든 실험은 5회씩 반복한 후 평균값을 산출하여 해석에 이용하였다.

III. 결과

1. 바닥스크린의 순간격에 따른 공급재료 퇴적의 양적 변화

바닥스크린을 설치하지 않는 경우(무시설)와 순간격이 각각 3mm, 9mm 및 15mm인 바닥스크린을 설치하였을 경우에 따른 공급재료의 유출량 및 퇴적량의 변화는 <Table 1>과 같다. 먼저 바닥스크린을 설치하지 않은 경우, 공급재료의 평균 총 퇴적량은 435g으로 나타나 총 공급량(9,000g) 중 평균 95.2%에 해당하는 공급재료가 하류로 유출된 것으로 파악되었다. 이와는 달리

Table 1. Differences in storage volume and percentage according to the absence and slit apertures of flat-board debris-flow breaker (FDB) when the bed-materials with 9 kg were supplied

Storage sites by FDB	Non-structured		FDB-structured					
	Volume (g)	Percent (%)	Slit aperture w/ 3-mm wide		Slit aperture w/ 9-mm wide		Slit aperture w/ 15-mm wide	
	Volume (g)	Percent (%)	Volume (g)	Percent (%)	Volume (g)	Percent (%)	Volume (g)	Percent (%)
By wings	322± 77 ^a	3.6	355± 51 ^a	3.9	443± 148 ^a	4.9	370± 225 ^a	4.1
On upper surface	113± 45	1.3	3,537± 296 ^a	39.3	2,530± 341 ^b	28.1	74± 54 ^c	0.8
Under lower surface			1,034± 325 ^a	11.5	4,022± 646 ^b	44.7	6,773± 71 ^c	75.3
At both sides	0± 0 ^a	0.0	1,390± 597 ^b	15.4	442± 259 ^c	4.9	45± 59 ^d	0.5
Total storage	435± 98 ^a	4.8	6,316± 459 ^b	70.2	7,437± 299 ^c	82.6	7,262± 219 ^c	80.7
Total export	8,565± 98 ^a	95.2	2,684± 459 ^b	29.8	1,563± 299 ^c	17.4	1,738± 219 ^c	19.3

Note: FDB represents the flat-board debris-flow breaker. All volume data were expressed as mean and standard deviation (SD). Different letters following mean±SD indicate significant ($P < 0.05$) differences in each storage site based on Tukey-HSD multiple comparisons, but comparisons between amount values in the non-structured and FDB-structured were not performed in the columns of the upper and lower surface of FDB.

순간격의 크기가 공급재료의 평균직경과 일치하는 3mm 순간격의 바닥스크린에 의해서는 6,316g, 순간격의 크기가 공급재료의 최대직경에 가까운 9mm 순간격의 바닥스크린에 의해서는 7,437g, 15mm 순간격의 바닥스크린에 의해서는 7,262g의 공급재료가 평균적으로 퇴적되는 것으로 나타났다. 즉, 순간격이 3mm, 9mm 및 15mm인 바닥스크린의 경우, 총 공급량 중 각각 29.8%, 17.4% 및 19.3%에 해당하는 공급재료가 평균적으로 유출된 것으로 추정되어 바닥스크린의 설치로 인해 공급재료의 유출량이 급격히 감소하는 것을 알 수 있었다.

한편, 순간격이 3mm, 9mm 및 15mm인 바닥스크린 설치시의 평균 총 퇴적량(6,316g, 7,437g 및 7,262g) 중에서 바닥스크린의 어깨부에 의한 공급재료의 퇴적량(355g, 443g 및 370g)을 제외한 평균 퇴적량은 각각 총 공급량의 66.2%, 77.7% 및 76.6%로 나타나 바닥스크린의 순간격이 9mm와 15mm일 경우가 순간격이 3mm일 때보다 상대적으로 많은 양의 공급재료를 포착하는 것으로 나타났다. 그러나 바닥스크린의 상단면부와 하단면부에 퇴적된 양으로 구분하여 살펴보면, 순간

격이 3mm일 때는 바닥스크린의 상단면부와 하단면부에 각각 총 공급량의 39.3%와 11.5%, 순간격이 9mm일 때는 각각 28.1%와 44.7%, 순간격이 15mm일 때는 각각 0.8%와 75.3%로 나타났다. 즉, 바닥스크린의 상단면부에서는 바닥스크린의 순간격이 작을수록 많은 양의 공급재료가 퇴적되는 것으로 나타난 반면, 바닥스크린의 하단면부에서는 바닥스크린의 순간격이 클수록 많은 양의 공급재료가 퇴적되는 것으로 나타났다. 다만, 바닥스크린의 상단면부로부터 이탈하여 측면부에 퇴적된 공급재료의 양은 순간격이 3mm, 9mm 및 15mm일 때 각각 총 공급량의 15.4%, 4.9% 및 0.5%로 나타나 바닥스크린의 순간격이 작을수록 많은 양이 이탈하는 것으로 나타났다.

2. 바닥스크린의 순간격에 따른 공급재료 퇴적의 질적 변화

바닥스크린을 설치하지 않는 무시설 구간과 순간격이 각각 3mm, 9mm 및 15mm인 바닥스크린 설치구간을 통한 공급재료의 입경조성을 파악한 결과는 <Figure 6>과 같다. 먼저 무시설시 바닥스크린의 설치

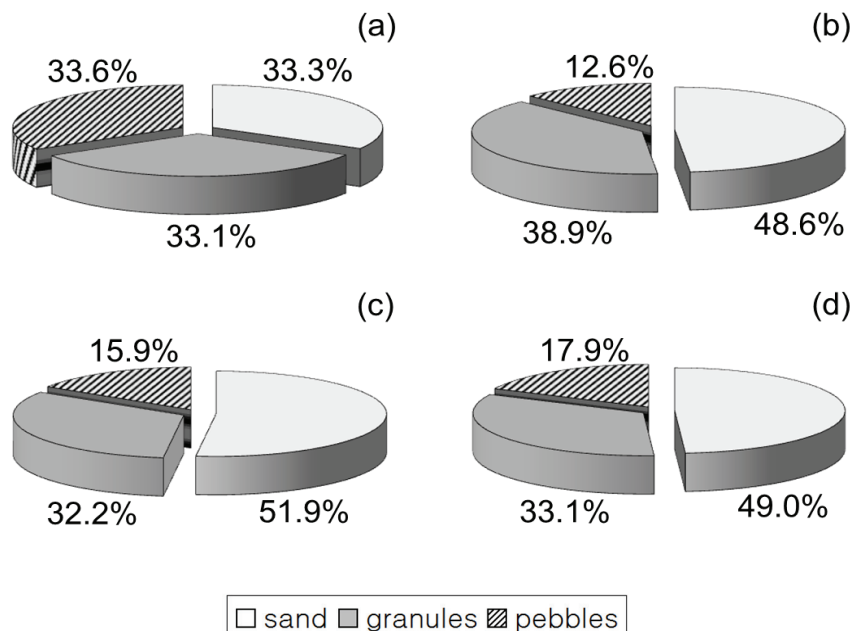


Figure 6. Proportions of each material's exported volume to total supplied volume
 (a) Non-structured, (b) Flat-board debris-flow breaker (FDB) with the 3-mm wide slit aperture,
 (c) FDB with the 9-mm wide slit aperture, (d) FDB with the 15-mm wide slit aperture.

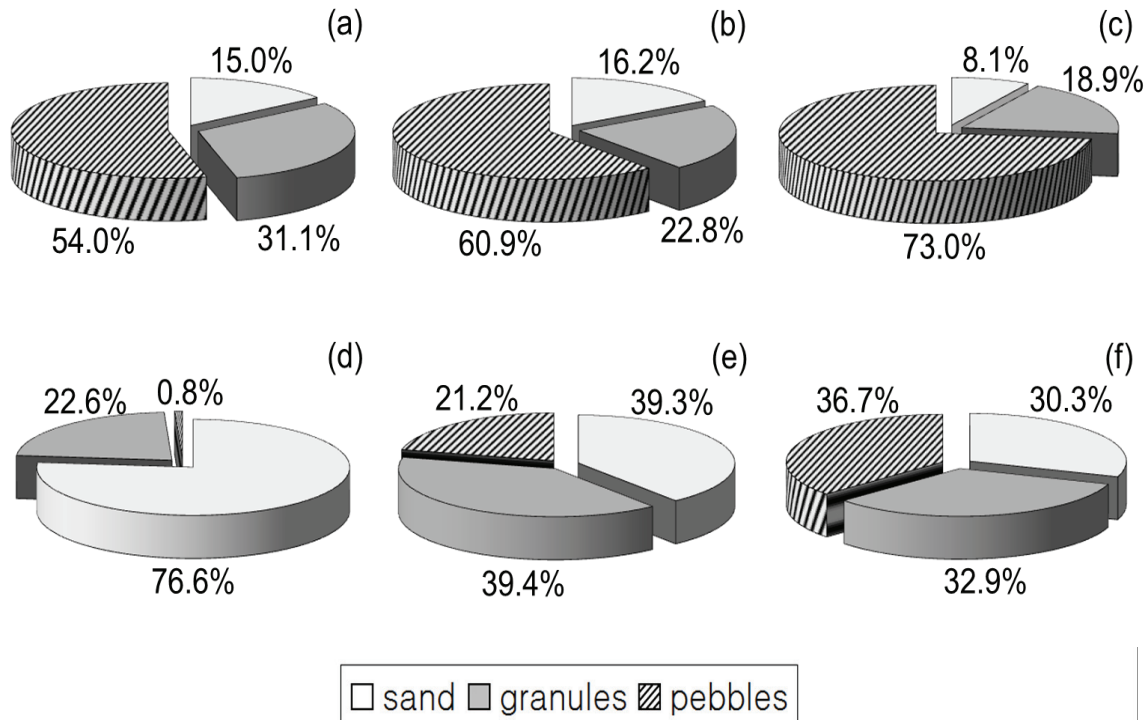


Figure 7. Proportions of each material's stored volume to total stored volume on the upper surface and under the lower surface of flat-board debris-flow breaker (FDB)

(a) On the upper surface of FDB with the 3-mm wide slit aperture, (b) On the upper surface of FDB with the 9-mm wide slit aperture, (c) On the upper surface of FDB with the 15-mm wide slit aperture, (d) Under the lower surface of FDB with the 3-mm wide slit aperture, (e) Under the lower surface of FDB with the 9-mm wide slit aperture, (f) Under the lower surface of FDB with the 15-mm wide slit aperture

대상구간에서 퇴적된 공급재료를 이용하여 하류로 유출된 공급재료의 입경조성을 추정한 결과, sand, granules 및 pebbles의 평균 구성비가 각각 33.3%, 33.1% 및 33.6%로 나타나 입경조성과는 관계없이 대부분의 공급재료가 하류로 유출된 것으로 파악되었다. 그러나 바닥스크린이 설치된 구간을 통과한 sand, granules 및 pebbles의 평균 구성비를 살펴보면, 순간격의 크기가 공급재료의 평균직경과 일치하는 3mm일 때 각각 48.6%, 38.9% 및 12.6%, 순간격의 크기가 공급재료의 최대직경에 가까운 9mm일 때 각각 51.9%, 32.2% 및 15.9%, 순간격의 크기가 15mm일 때 각각 49.0%, 33.1% 및 17.9%로 나타났다. 즉, 공급재료의 입경이 클수록 바닥스크린의 설치구간을 통과하는 과정에서 퇴적되고, 공급재료의 입경이 작을수록 하류로 유출되는 것을 알 수 있었다.

한편, 바닥스크린의 상단면부와 하단면부에 퇴적된

공급재료를 대상으로 입경조성을 파악한 결과는 <Figure 7>과 같다. 먼저 바닥스크린의 상단면부에 퇴적된 공급재료의 입경조성을 파악한 결과, 순간격이 3mm인 바닥스크린에서는 sand, granules 및 pebbles의 평균 구성비가 각각 15.0%, 31.1% 및 54.0%, 순간격이 9mm인 바닥스크린에서는 각각 16.2%, 22.8% 및 60.9%, 순간격이 15mm인 바닥스크린에서는 각각 8.1%, 18.9% 및 73.0%로 나타났다. 그러나 바닥스크린의 하단면부에 퇴적된 토석을 이용하여 동일한 분석을 실시한 결과, 순간격이 3mm인 바닥스크린에서는 sand, granules 및 pebbles의 평균 구성비가 각각 76.6%, 22.6% 및 0.8%, 순간격이 9mm인 바닥스크린에서는 각각 39.3%, 39.4% 및 21.2%, 순간격이 15mm인 바닥스크린에서는 각각 30.3%, 32.9% 및 36.7%로 나타나 순간격이 작을수록 바닥스크린의 하단면부에 퇴적된 공급재료의 입경이 최소화되는 것으로 나타났다.

IV. 고찰

일반적으로 계상물매가 급한 계류구간에서는 유수의 유송능력과 더불어 소류사의 이동능력이 급격하게 증가되는데(Knighton, 1998; Knighton, 1999; Seo, *et. al.*, 2010), 이러한 경향은 국내외의 토석류를 대상으로 한 연구에서도 마찬가지로 보고되고 있다(Kim, *et. al.*, 2008; Conesa-Garcia & Lenzi, 2010). 결국 토석류의 흐름은 계폭이 넓거나 경사가 완만한 지형조건인 계류구간에서 정지하게 되며(Benda & Cundy, 1990; Lancaster, *et. al.*, 2003; Seo & Nakamura, 2009), 퇴적된 후 입경의 분급에 따른 조립화가 발생한 후 다시 후속되는 유수에 의해 운반되어 온 토사들에 의해 세립화되는 것이 일반적이다(Watanabe, *et. al.*, 1980). 그러나 이 연구의 결과로 볼 때, 바닥스크린은 시공 지점 상에서 상류로부터 유입되는 토석류의 유수와 토석을 순간적으로 분리함으로써 토석류의 운동에너지를 급격히 감소시켜 퇴적을 유도하는 것으로 나타났으며(〈Table 1〉), 더불어 바닥스크린의 설치구간을 중심으로 하여 하류지역에 큰 피해를 줄 수 있는 큰 입경의 계상재료를 우선적으로 포착하는 것으로 나타났(〈Figure 5〉). 이는 실제의 산지계류를 대상으로 토석류의 이동에 대한 바닥스크린의 기능적 효과를 분석한 Kiyono, *et. al.*(1986)와 Imai, *et. al.*(1989)의 연구결과와 일치하였다.

한편, 바닥스크린은 구조적 특성상 한 차례의 토석류를 경험하였더라도 다음의 발생할 토석류에 대비하기 위해서는 바닥스크린의 손상이나 막힘, 복구 상의 문제점 등을 규명하여 퇴적토석을 반드시 제거해야 할 것이다. 실제로 Kiyono, *et. al.*(1986)는 바닥스크린의 순간적 결정에 필요한 요소로서 계상재료의 입경분포와 더불어 제석의 난이도를 제시하였으며, 조약돌 크기 정도보다 큰 계상재료는 바닥스크린의 아래로 낙하시키지 않도록 하는 것이 바람직하다고 하였다. 이는 바닥스크린의 하단면부에서는 소규모의 증장비를 이용하더라도 제석이 불가능하다는 점을 반영한다고 볼 수 있다.

이 연구의 결과에서 나타난 바닥스크린 하단면부에 퇴적된 공급재료의 양은 순간격이 클수록 많은 양의 공급재료가, 그리고 큰 입경의 공급재료가 퇴적되는 것으로 나타났으며(〈Table 1〉과 〈Figure 7〉), 이는 바닥스크린이 계상재료의 평균입경과 동일한 순간격을 지닐 때가 계상재료의 최대입경 혹은 그 이상일 때에 비해 상대적으로 바람직한 기능을 한다는 것을 역으로 보여주는 것으로 사료된다.

이상에서 바닥스크린의 순간격은 계상재료의 평균입경과 동일하도록 설치하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있었다. 다만, 바닥스크린의 상단면부에 퇴적된 토석의 양만을 살펴보면, (비록 공급재료의 평균입경과 동일한 3mm 순간격의 바닥스크린이 가장 큰 퇴적량을 유도하였다 할지라도) 바닥스크린의 순간격 크기에 상관없이 총 토석량의 40% 미만이 체류되는 것으로 나타났으며(〈Table 1〉), 이는 본 실험에서 상정한 계류환경의 물리적 조건에서는 바닥스크린의 시공으로 인한 본연의 순기능을 충분히 발휘하였다고 보기는 어렵다. 특히, 공급재료의 평균입경과 동일한 3mm 순간격의 바닥스크린을 설치했을 때, 상대적으로 많은 양의 공급재료가 바닥스크린의 상단면부에 퇴적되지 않고 측면부로 이탈하는 현상이 발생하였다(〈Table 1〉). 이는 바닥스크린의 상단면부에 다양한 입경의 토사가 다량 퇴적하여 순간격이 메워짐으로써 토석류의 선단부를 뒤따르던 토석들의 흐름이 측면부 방향으로 전환된 결과로 사료된다.

V. 결론

이 연구에서는 토석류 피해저감을 위한 방법으로 국내에 보고된 바 없는 새로운 구조의 사방시설물인 철강재 바닥스크린의 순간격에 따른 토석류의 포착효과를 모형실험을 통하여 양적·질적으로 파악하였다. 그 결과, 바닥스크린의 설치로 인해 공급재료의 유출량이 급격히 감소하는 것을 파악할 수 있었으며, 특히 바닥스크린의 순간격이 계상재료의 평균입경과 동일한 경우

에 토석류의 운동에너지를 저감시켜 퇴적을 유도하는 바닥스크린의 양적·질적 기능이 주어진 계류환경의 물리적 조건에서 최대로 발휘하는 것으로 나타났다.

그러나 한편으로는 바닥스크린의 순간적이 계상재료의 평균입경과 동일한 경우에도 바닥스크린의 측면부로 이탈되는 현상을 관측할 수 있었으며, 이러한 문제를 해결하기 위하여 바닥스크린의 측면부에 추가적인 구조물의 설치에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다. 더불어 이를 뒷받침할 수 있는 명확한 연구결과가 제시되어야 할 것이며, 나아가 시공대상구역의 다양한 계상조건과 토석류 발생량에 대한 정확한 예측을 근거로 바닥스크린의 종·횡단적 규모에 관한 분석도 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 산림청 산림과학기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며(관리번호-S111215L050110), 부분적으로 2014학년도 강원대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(관리번호-120140160).

References

- Benda, Lee E. and Terrance W. Cundy. 1990. Predicting Deposition of Debris Flows in Mountain Channels. *Canadian Geotechnical Journal*. 27: 409-417.
- Chun, Kum Woo. 2011. *New Erosion Control Engineering*. Seoul: Hyangmunsa.
- Conesa-Garcia, Carmelo and Mario A. Lenzi. 2010. *Check Dams, Morphological Adjustments and Erosion Control in Torrential Streams*. New York, NY: Nova Science Publishers.
- Gonda, Yutaka. 2009. Function of Debris-flow Braker. *International Journal of Erosion Control Engineering*. 2(1): 15-21.
- 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.
- International Center for Water Hazard and Risk Management. 2008. Debris-flow Dewatering Brakes: A Promising Tool for Disaster Management in Developing Countries. *International Center for Water Hazard and Risk Management Newsletter*. 3(3): 10.
- Jun, Kye Won, Chae Yeon Oh, and Byong Hee Jun. 2011. Study on Analyzing Characteristics Which Causes a Debris Flow: Focusing on the Relation with Slope and River. *Korean Review of Crisis & Emergency Management*. 7(3): 223-232.
- 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 & Emergency Management*. 8(3): 137-146.
- Jung, Wook Kyo, Kye Won Jun, and Won Jun Tak. 2015. A Study on Model Manufacturing of Debris Flow Control Dam Utilizing a 3D Print for Debris Flow Experiment. *2015 Korean Geo-Environmental Society Conference(15th Anniversary)*. 241-244.
- Kim, Jin Hak. 2013. Experimental Study on Float-Board Screen for Catching Drift Woods and Debris Flows in Urban Areas. Master's thesis. Kangwon National University.
- Kim, Ki Hwan, Dong Hyuk Lee, Dae Hoe Kim, and Seung Ho Lee. 2008. A Study on Model Tests for Debris Flow Characteristics. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*. 9(5): 83-89.
- Kim, Kyeong Su, Won Young Kim, Byung Gon Chae, and Yong Chan Cho. 2000. Engineering Geologic Characteristics of Landslide Induced by Rainfall: Boeun Chungcheongbuk-do. *The Journal of Engineering Geology*. 10(2): 163-174.
- 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, Suk Woo, Kun Woo Chun, Jin Hak Kim, Min Sik Kim, and Min Seok Kim. 2012a. Characteristics of Heavy Rainfall for Landslide-triggering in 2011. *Journal of Korean Forest Society*. 101(1): 28-35.
- 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.
- Kim, Yeon Joong, Hajime Nakagawa, Kenji Kawaike, and Hao Zhang. 2012b. Numerical and Experimental Study on Debris-flow Breaker. *Disaster Prevention Research Institute Annuals*. 55(B): 471-481.
- 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.
- Knighton, David A. 1998. *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. London: Arnold.
- Knighton, David A. 1999. Downstream Variation in Stream Power. *Geomorphology*. 29: 293-306.
- Korea Forest Service. 2012. *Master Plan of Erosion Control Works in 2012-2017*. Daejeon: Korea Forest Service.
- Lancaster, Stephen T., Shannon K. Hayes, and Gordon E. Grant. 2003. Effects of Wood on Debris Flow Runout in Small Mountain Watersheds. *Water Resources Research*. 39(6): 1168.
- Seo, Jung Il and Futoshi Nakamura. 2009. Scale-dependent Controls upon the Fluvial Export of Large Wood from River Catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*. 34: 786-800.
- Seo, Jung Il, Futoshi Nakamura, and Kun Woo Chun. 2010. Dynamics of Large Wood at the Watershed Scale: A Perspective on Current Research Limits and Future Directions. *Landscape and Ecological Engineering*. 6: 271-287.
- VanDine, Douglas F. 1985. Debris Flows and Torrents in the Southern Canadian Cordillera. *Canadian Geotechnical Journal*. 22(1): 44-68.
- Watanabe, Masayuki, Takahisa Mizuyama, and Shinji Uehara. 1980. A Research on Erosion Control Facilities for Preventing Ventings by Debris Flows. *International Journal of Erosion Control Engineering*. 32(4): 40-45.
- 지질공학적 특성: 충청북도 보은지역. *지질공학회지*. 10(2): 163-174.
- 김기환, 이동혁, 김대희, 이승호. 2008. 토석류 흐름 상태 특성 파악을 위한 모형실험 연구. *한국지반환경공학회 논문집*. 9(5): 83-89.
- 김석우, 권세명, 전근우, 쓰기오에자키(江崎次夫). 2011. 산지 계류의 계상변동에 관한 양적·질적 해석. 2011 산림과학 공동학술대회 논문집. 710-711.
- 김석우, 전근우, 김진학, 김민식, 김민석. 2012a. 2011년 집중호우로 인한 산사태 발생특성 분석. *한국임학회지*. 101(1): 28-35.
- 김원영, 이사로, 김경수, 채병곤. 1998. 지형특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성: 연천-철원지역을 대상으로. *지질공학회지*. 8(2): 115-130.
- 김진학. 2013. 도심지역의 유목 및 토석류 포착용 철강재 바닥 스크린에 관한 실험적 연구. *강원대학교 대학원 석사학위논문*.
- 산림청. 2012. 2012-2017 사방사업 기본 계획. 대전: 산림청.
- 전계원, 오채연, 전병희. 2011. 토석류 유발 특성인자 분석에 관한 기초연구: 경사, 하천과의 관계를 중심으로. *한국위기관리논집*. 7(3): 223-232.
- 전근우. 2011. *신고 사방공학*. 서울: 향문사.
- 전병희, 전계원, 장창덕. 2012. 산지재해 연구를 위한 토석류 실험장치의 개발 방안. *한국위기관리논집*. 8(3): 137-146.
- 정육교, 전계원, 탁원준. 2015. 토석류 실험을 위한 3D 프린터를 활용한 사방시설 모형제작에 관한 연구. 2015년 한국지반환경공학회 정기총회 및 학술발표회. 241-244.

Japanese References Translated from the English

- 渡辺正幸, 水山高久, 上原信司. 1980. 土石流対策砂防施設に関する検討. *砂防学会誌*. 32(4): 40-45.
- 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.

Korean References Translated from the English

- 김경수, 김원영, 채병곤, 조용찬. 2000. 강우에 의한 산사태의

Received: Mar. 22, 2016 / Revised: Mar. 30, 2016 / Accepted: Apr. 7, 2016

생활권 산록지역에 있어서 토석류 피해 저감을 위한 철강재 바닥스크린의 최적 순간격 파악

국문초록 이 논문에서는 토사처리 공간이 제한적인 생활권 산록지역에서의 토석류 피해를 저감시키기 위한 신공법인 바닥스크린의 최적 순간격을 도출하기 위한 목적으로, 모형수로 상에서 바닥스크린의 토석류 포착 효과를 정량적·정성적으로 평가하였다. 그 결과, 바닥스크린은 상류로부터 유입되는 토석류의 유수와 토석을 순간적으로 분리함으로써 토석류의 운동에너지를 급격히 감소시켜 퇴적을 유도하는 것으로 나타났으며, 더불어 바닥스크린의 설치구간을 중심으로 하류지역에 큰 피해를 줄 수 있는 큰 입경의 계상재료를 우선적으로 포착하는 것으로 나타났다. 특히, 순간격이 클수록 바닥스크린 하단면부에 큰 입경의 공급재료가 다량 퇴적되는 것으로 나타났으며, 이는 구조적 특성 상 반드시 제석이 요구되는 바닥스크린이 계상재료의 평균입경과 동일한 순간격을 지닐 때가 상대적으로 최적의 기능을 한다는 것을 역으로 나타낸다. 그러나 한편으로는 최적 순간격의 경우에도 바닥스크린의 측면부로 토석이 이탈하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 바닥스크린의 상단면에 다양한 입경의 토석이 쌓이면서 토석류의 선단부를 뒤따르던 토석들의 이동방향이 측면부로 변하였기 때문으로 판단된다.

주제어 : 토석류, 모형수로, 계상재료, 입경, 제석

- Profiles **Jin Hak Kim** : He is a research course in the Department of Forest Resources, College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University in Korea, and has finished all the required courses for graduation. His research interests include debris-flow mechanism, urban erosion control works and related structures, and flume test(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 263 articles in journals and the written 20 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 42 articles in national/international journals and the written 3 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 52 articles in journals and written 3 co-author books(secontrol@naver.com).
- Ju Ung Yun** : He is a doctor course student in the Department of Forest Resources, College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University in Korea. Research interests include forest wetland, forest hydrology and suspended load transport(dogking2001@hanmail.net).
- 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 58 articles in journals and written 7 books (including co-author books)(kwjun@kangwon.ac.kr).