

실규모 실험검증을 통한 스위퍼의 유송잡물 저감능력 검토

김성중¹, 정도준², 강준구¹, 여흥구¹, 김종태^{*}

¹한국건설기술연구원 하천실험센터, ²국립재난안전연구원

Verification on Debris Reduction Ability of the Sweeper by Real Scale Experiment

Sung-Joong Kim¹, Do-Joon Jung², Joon-Gu Kang¹, Hong-Koo Yeo¹, Jong-Tae Kim^{*}

¹River Experiment Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²National Disaster Management Institute

요약 본 연구는 소하천을 대상으로 홍수로 인한 교량에서의 유송잡물 집적을 방지하기 위한 저감시설에 대한 실험연구이다. 일반적으로 소하천은 태풍 및 집중호우 시 유송잡물에 의한 구조물 피해가 빈번하게 발생하고 있으나 이러한 피해에 대한 저감대책은 전무한 실정이다. 국외에서는 유송잡물로 집적으로 인한 피해저감시설로 수직분리대방식, 말뚝시설방식, 스위퍼 방식에 대해 소개하고 있다. 이에 본 연구에서는 유송잡물 저감시설 중 스위퍼를 대상으로 실규모 집적실험을 통해 저감능력을 검토하고자 하였다. 스위퍼는 교각전면부에 설치하여 자력회전을 통해 유송잡물을 우회시켜 교각에 유송잡물이 집적되지 않게 만드는 시설이다. 실규모 실험을 위해 소교량 모형을 실험크기로 제작하였으며, 유송잡물 길이와 흐름조건에 따라 스위퍼 설치 전·후 집적실험을 통해 저감능력을 검토하였다. 실험결과 유송잡물의 길이가 길어지거나 유속이 적을 경우 집적률이 높게 나타나는 것으로 나타났다. 스위퍼 설치에서 따른 유송잡물의 집적률은 스위퍼 설치 전에 비해 최소 55%에서 최대 88%의 유송잡물 집적률이 저감되는 것으로 확인되었다. 이러한 결과로 판단할 때 유송잡물 잠재능력이 높은 소하천에 스위퍼를 설치할 경우 유송잡물 집적으로 인한 교량의 안정성 확보 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

Abstract This study is an experimental study about a facility for preventing the accumulation of floating debris at a bridge by flooding at a small river. Generally, structures installed at a small river are damaged frequently by floating debris during typhoons or localized rainfall events. On the other hand, there is no method available for preventing such damage. The facilities used in other countries to prevent such damage by the accumulation of floating debris include debris fins, deflectors, and sweeper. Among these facilities, the present study was conducted with a sweeper to investigate the damage-reducing capability through a real-scale accumulation experiment. A sweeper was installed in front of a bridge to bypass floating debris by self-rotation so that the floating debris may not be accumulate at the bridge. A small bridge model was prepared in a real-scale for the real-scale experiment. The accumulation reducing capability was compared through an accumulation experiment before and after the sweeper installation depending on the length of the debris and flow conditions. The result showed that the accumulation rate increased with increasing length of the debris or decreasing flow rate. The installation of a sweeper decreased the debris accumulation rate by a minimum of 55% to a maximum of 88% compared to the case without an installed sweeper. The result of the present study showed that the installation of a sweeper at a small river having a high potential of generating floating debris may help secure the stability of a bridge in the case of floating debris accumulation.

Keywords : Debris accumulation, Debris reduction facility, Real scale experiment, Sweeper

본 논문은 국민안전처 국립재난안전연구원의 지원(NDMI-주요-2015-01-02-03-02)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Jong-Tae Kim(KICT)

Tel: +82-54-843-1803 email: kjt98@kict.re.kr

Received August 4, 2016

Revised September 8, 2016

Accepted September 9, 2016

Published September 30, 2016

1. 서론

소하천은 일반적으로 국가하천이나 지방하천에 비해 단면이 작아 유속이 빠르며 집중호우 때 유입되는 유송잡물 및 토석류로 교량 파괴 등의 홍수 피해가 발생할 위험이 크다. 특히 태풍 및 집중호우 시 유송잡물에 의한 구조물 피해가 빈번하게 발생하고 있으나 현재 국내 특성에 적합한 유송잡물 피해저감 기술에 대한 연구는 부족하다. 스위퍼(debris sweeper)는 교각 사이로 유송잡물을 내보내는 저감시설로써 구조물 상류에서 유송잡물을 제거하거나 유입을 방지하는 방법보다 유용할 수 있어 설치가 증가하고 있다. 또한 수직으로 만들어진 축에 의해 상하로 움직일 수 있어 하천 수위조건에 따라 대응이 가능하다.

유송잡물 저감시설에 대한 국외 연구 동향 분석결과 미연방도로국(FHWA)[1]은 스위퍼 적용을 위한 하천환경 조건에 대한 연구를 수행하였다. 연구결과 스위퍼의 안정성만 확보되면 경도가 높고 규모가 큰 유송잡물에도 효과가 높은 것으로 나타났으며 유송잡물의 크기 및 형태에 따른 저감시설 선정방법을 제시하였다. 또한 AASHTO[2]와 Lagasse[3]는 스위퍼는 규모가 작은 유송잡물에서는 효과가 있으나 규모가 큰 유송잡물에서는 스위퍼의 안정성 확보가 어려우며 본체가 붕괴될 수 있음을 주장하였다. Lyn et al.[4]에 의하면 하천 유속이 느리면 효과적이지 않은 것으로 나타났으며 Ryan[5]은 스위퍼를 비롯한 유송잡물 저감시설의 장단점을 분석하였으며 하천 수심 변화에 의한 스위퍼 설치방법을 제시하였다.

국내 연구동향의 경우 유송잡물에 대한 연구는 다수 수행되었으나 유송잡물 저감을 위한 연구는 부족하다. Lee and Cho[6]는 유송잡물의 차단시설 설치를 위한 방안에 대해 제시하였으며 Lee[7]는 소하천 내 교량의 피해사례와 설치사례를 중심으로 차단시설을 제시하였다. Kim et al.[8]는 유송잡물은 지역별 기후와 식생 조건 등에 따라 크기, 경도 등이 다르기 때문에 지역조건에 적합한 교량 건설과 차단시설 설치가 필요하다고 언급하였으며 유송잡물 저감시설들을 대상으로 모형실험을 수행하고 저감효과를 비교하였다.

소하천 교량 설치 시 흐름 변화 및 하폭 감소를 위한 설계 및 저감시설의 설치에 피해방지를 위해 반드시 고려해야 할 항목이다. 그러나 현재 국내에서는 유송잡물의

배수영향에 의한 홍수피해 및 세굴 등에 대한 연구가 주를 이루고 있으며 교량 시설물 피해저감을 위한 유송잡물 차단시설에 대한 연구는 거의 없다. 또한 이론 제시 및 모형실험 수준이므로 현장적용을 위한 실규모 실험이 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 유송잡물의 교량 집적을 방지하기 위한 차단시설 중 미연방도로국에서 제안한 스위퍼의 실규모 검증 실험을 수행하였다. 실험은 스위퍼 설치 유·무, 흐름조건, 유송잡물 길이, 투하방법에 따라 유송잡물의 집적량을 통해 유송잡물 저감능력을 검토하고자 하였다.

2. 모형제작 및 실험조건

2.1 스위퍼

유하된 유송잡물은 하천을 횡단하거나 하천 내 설치된 구조물에 집적이 이루어지면서 하천 통수능 저감, 구조물 기초부에서의 세굴, 시설물의 항력증가 등의 영향을 받게 된다. 이로 인해 시설물 주변에서는 수위상승으로 인한 시설물 및 제방 율류, 세굴로 인한 기초부 약화, 항력증가로 인한 시설물 파괴 등의 피해가 발생하게 된다. 이러한 피해를 예방하기 위해서는 하천구조물의 안전성을 확보하기 위해 돌발 상황을 견딜 수 있는 구조물로 설계를 하는 방법이 최선책이나 현실적 상황을 고려할 때 불가능하다.

이러한 유송잡물로 인한 피해를 저감하기 위한 1차적 대안은 유송잡물이 구조물에 집적되지 않도록 함으로써 피해를 저감할 수 있으며 이는 저감시설을 설치함으로써 가능하다. 일반적으로 근래 소하천 설치되는 교량은 하폭이 좁을 경우 하천흐름에 영향을 받지 않도록 교각이 없는 형태로 이루어져 있으나 부득이하게 하폭이 넓어 교각을 설치할 경우가 있다. 하천 내에 설치되는 구조물은 홍수로부터 안전할 수 없으며 유송잡물이 집적되기 쉬운 약점을 가지고 있기 때문에 다량의 유송잡물이 발생하는 지역에서는 저감시설이 필수적으로 설치함으로써 피해를 예방할 수 있어야 한다.

유송잡물 저감시설의 원리를 간단히 설명한다면 유수로 인해 유하되는 유송잡물을 구조물 주변에 설치된 저감시설을 통해 우회 또는 회피시켜 구조물을 보호하는 것이다. 교량을 대상으로 한 유송잡물 저감시설은 미연방도로국에서 다음의 3가지 방법을 소개하고 있다. 첫



Fig. 1. Debris Deflector(FHWA, 2005)
 (a) debris fin (b) debris deflector (c) debris sweeper

번째는 수직분리대 방식(Fig. 1(a))으로 유송잡물을 우회시키는 시설이다. 일반적으로 교각전면부에 설치되며 수심을 고려하여 삼각형 형태로 설치된다. 두 번째 우회말뚝 방식(Fig. 1(b))은 유송잡물을 우회말뚝을 통해 우회 또는 1차 집적을 시켜 교각을 보호하는 방법으로 일반적으로 교각으로부터 상류단에 설치된다. 세 번째 스위퍼 방식(Fig. 1(c))은 원통형태의 나선형 구조인 스위퍼를 설치하여 유수의 힘으로 회전이 발생하여 유송잡물을 우회시키는 방법이다. 본 연구에서 다루고자하는 저감시설은 기존 하천구조물에 간단한 설치를 통해 저감효과를 발휘할 수 있는 스위퍼 방식에 대한 실규모 실험을 수행하고자 하였다.

2.2 실험수로 및 모형

실규모 실험을 수행하기 위한 실험수로는 안동하천실험센터에 설치된 직선수로를 이용하였다(Fig. 2). 실규모 직선수로는 최대 10.0 m³/s의 유량공급 능력을 가지고 있으며, 길이 600.0 m로 하상경사는 1:800으로 구성되어 있다. 수로의 단면은 사다리꼴 형태의 단단면 수로로 저수로 폭은 3.0 m, 높이 2.0 m, 경사는 1:2로 구성되며 만제폭은 11.0 m 이다.

실험수로에 설치된 모형교량은 소교량 표준단면도[9]를 참고하여 실규모 축척으로 설계하였다(Fig. 3). 모형교량은 두께 0.45 m, 높이 1.2 m, 길이 1.2 m의 제원을 가지고 있으며 교각의 단면형상은 사각형 형태이며 모르타르로 제작하였다. 본 저감시설 연구의 대상인 스위퍼는 FHWA의 설계방법을 고려하여 원통형의 PVC관과 폭 0.05 m의 고무롤을 이용해 제작하였다. 스위퍼의 폭은 교각두께보다 좁은 0.38 m의 직경을 가지고 있으며, 높이는 교각 및 실험조건을 가정하여 0.80 m로 제작하였

다. 스위퍼는 외부적인 에너지가 공급되지 않고 오로지 유수에 의해 자력으로 회전할 수 있도록 스위퍼 표면을 나선형으로 제작하였으며, 퇴적물로 인한 스위퍼의 오작동 방지를 위해 수로 바닥면으로부터 0.10 m 상부에 설치하였다(Figs. 4 ~ 5).

유송잡물로 인한 저감시설의 검증을 위한 유송잡물 재료는 Fig. 6과 같이 수고 2.5 m, 3.0 m, 3.5 m 인 나뭇가지를 이용하여 실험을 수행하였다. 유송잡물 재료는 평균 4.9 cm의 직경을 가지며, 집적이 수월하게 이루어질 수 있도록 잔가지를 가지고 있는 형태를 실험대상으로 선택하였다.



Fig. 2. Andong River Experiment Center



Fig. 3. Real Scale Experiment Channel



Fig. 4. Sweeper(front view)



Fig. 5. Sweeper(top view)



Fig. 6. Woody Debris

2.3 실험조건 및 방법

유송잡물 저감시설 실험은 스유퍼의 저감효과를 검토하기 위한 실험으로 스유퍼 설치 유무에 따른 비교실험으로 계획하였다. 각각의 실험에서의 조건은 유송잡물의 길이를 3가지 분류하여 동일 수위를 갖는 흐름조건에서 Fr(Froude number)변화에 따른 집적실험을 수행하였다. 유송잡물 투하방법은 단일투하와 2개 동시투하 2 가지 방법으로 유송잡물 집적실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 1과 같다.

유송잡물의 집적량을 측정하는 방법은 유송잡물의 집적이 이루어지지 않은 경우 다음의 유송잡물을 바로 투하 하였으며, 집적이 이루어진 경우 1분의 시간을 기다린 후 다음의 유송잡물을 투하하였다. 각각의 실험은 3회 이상 반복실험을 수행하였으며, 동일한 재료를 반복적으로 활용하고 동일한 실험자가 유송잡물을 투하하게 함으로써 오차를 최소화하고 일관성 있는 실험이 이루어질 수 있도록 실험을 수행하였다.

3. 실험분석

유송잡물은 참나무과 목본류로 평균적으로 5 ~ 6개의 잔가지를 갖는 식물재료를 사용하였으며 4.9 cm의 평균직경을 갖고 있다. 유송잡물의 집적률은 20개의 유송잡물 모형에 대해 교각 또는 스유퍼에서 집적이 이루어질 경우 이를 비율로 산정(집적개수/투하개수 × 100%)하였다.

3.1 스유퍼 설치 전

스유퍼 설치 전 유송잡물 집적실험은 유송잡물 길이비($L_d=L/W_p$)와 흐름조건(Froude number)에 대해 실험결과를 검토하였다. 집적실험의 결과는 Table 2 ~ 3에 나타내었다. Table 2는 1개 투하 시 집적량을 나타낸 것

Table 1. Experiment Conditions

Pier Width (W_p , m)	Fr	Depth (d, m)	Sweeper Installation	Debris			Drop Method	
				Type	Length (L, m)	Diameter (D, cm)		Debris Length Ratio(L/W_p) (L_d)
0.45	0.38 0.54	0.80	before	woody	2.5	4.7	5.6	1 drop
			after		3.0	4.7	6.7	2 drop
					3.5	5.4	7.8	

Table 2. Results of Accumulation Test(1 drop)

Time (min)	Fr=0.54			Fr=0.38		
	L _d =7.8	L _d =6.7	L _d =5.6	L _d =7.8	L _d =6.7	L _d =5.6
	N _{avg}					
1	0.67	1.00	0.67	1.00	0.67	0.67
2	0.67	1.67	1.67	1.67	1.33	1.33
3	1.33	2.67	2.33	2.67	2.33	1.33
4	2.33	3.00	3.00	3.67	3.00	1.00
5	3.33	3.33	2.33	4.67	3.67	2.00
6	3.00	4.33	3.33	5.67	4.67	3.00
7	4.00	5.00	2.33	6.33	5.33	4.00
8	5.00	5.67	2.33	7.33	5.67	5.00
9	6.00	6.67	3.33	8.33	6.67	5.67
10	7.00	7.67	4.33	9.33	7.67	6.00
11	8.00	8.67	4.67	10.33	8.33	5.33
12	9.00	9.67	5.33	11.33	9.33	6.33
13	10.00	10.67	5.67	12.00	10.33	7.00
14	11.00	11.67	6.67	13.00	11.33	8.00
15	12.00	12.67	7.67	14.00	12.33	8.33
16	13.00	13.67	8.33	15.00	13.00	9.00
17	14.00	14.67	9.33	16.00	13.67	10.00
18	15.00	15.67	10.33	17.00	14.33	10.33
19	16.00	16.67	11.00	17.67	15.00	10.67
20	17.00	17.67	12.00	18.33	16.00	10.33

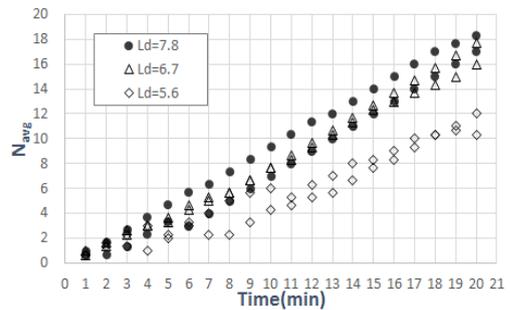
Table 3. Results of Accumulation Test(2 drop)

Time (min)	Fr=0.54			Fr=0.38		
	L _d =7.8	L _d =6.7	L _d =5.6	L _d =7.8	L _d =6.7	L _d =5.6
	N _{avg}					
1	1.67	1.67	1.00	1.67	1.00	2.00
2	3.67	3.33	2.00	3.67	2.67	2.67
3	5.33	4.00	3.67	5.67	4.67	2.33
4	7.33	6.00	4.67	7.67	6.00	4.00
5	9.33	5.67	5.67	9.67	8.00	4.67
6	11.33	6.67	4.67	11.67	10.00	6.33
7	13.33	8.33	6.33	13.67	11.67	8.33
8	15.33	8.67	8.33	15.67	13.67	10.00
9	17.33	10.67	10.00	17.67	15.67	12.00
10	19.33	12.33	12.00	19.67	17.33	14.00

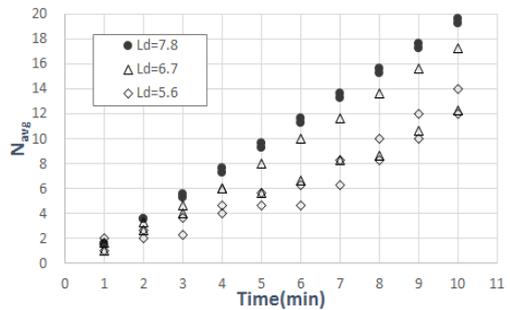
이며, Table 3은 2개 투하 시 결과를 나타낸 것이다. 실험결과에 나타나 있는 평균값(N_{avg})은 시간대별 집적개수의 합을 투하횟수로 나누어 평균한 값을 나타낸다.

3.1.1 유송잡물 길이에 따른 집적특성

Fig. 7은 투하방법에 따른 유송잡물의 길이별 집적량을 흐름조건에 관계없이 시간에 따라 표현한 것으로 x축은 시간(time), y축은 평균집적개수(N_{avg})를 나타낸다. 각각의 그래프는 유송잡물의 길이에 대한 영향을 검토하고자 하였기 때문에 흐름조건을 고려하지 않고 시간에 따른 집적량을 나타내었다. Fig. 7(a)는 1개 투하인 경우 유송잡물의 집적량을 나타내는 그래프로 초기부터 유송잡물의 집적이 자연스럽게 이루어지면서 추가집적이 이루어지는 상승곡선 형태로 형성되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 대부분 유송잡물의 길이비(L_d)가 길어질수록 집적률이 높게 나타났지만 집적형태에 따라 차이는 있는 것으로 나타났다. L_d가 7.8인 경우 교각에서의 유송잡물 집적률은 92%의 집적률을 보이고 있는 것으로 나타났다. L_d가 6.7인 경우 집적률은 88%로 나타났으며, 상대적으로 유송잡물 길이가 작은 L_d가 5.6인 경우에는 60%(12개 집적)의 집적률을 보이는 것으로 나타났다. 2개 투하 시 유송잡물의 집적률은 1개 투하조건에 비해 상대적으로 높은 집적률을 보이고 있는 것으로 확인되었



(a)



(b)

Fig. 7. Variations of Debris Accumulation According to Drop Method(before installation) (a) 1 drop (b) 2 drop

다. Fig. 7(b)와 같이 2개 투하시 L_d 가 7.8인 경우 교각에서의 유송잡물 집적률은 98%로 발생하였으며, L_d 가 6.7인 경우 집적률은 87%로 나타났으며 L_d 가 5.6인 경우 집적률은 70%로 나타났다. 이와 같이 스유퍼 설치 전 교각에서의 유송잡물의 집적률이 높게 나타나는 것은 교각의 형상과 재질 그리고 유송잡물의 길이, 거칠기 등이 주요 변수로 작용함으로써 초기집적이 비교적 쉽게 이루어지기 때문인 것으로 판단되며, 이로 인해 추가적으로 투입되는 유송잡물의 집적이 유리하게 되는 환경을 조성하기 때문에 집적률이 높게 형성되는 것으로 판단된다.

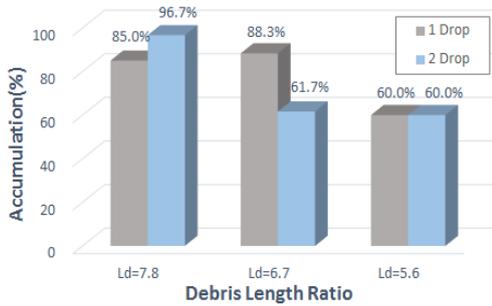
3.1.2 흐름조건에 따른 집적특성

유송잡물 집적실험의 흐름조건은 2가지 경우를 고려하였다. 유량변화를 통해 유속조건의 변화를 주었으며 수위는 일정하게 유지한 조건에서 유량의 변화를 통해 Fr에 따른 영향을 검토하고자 하였다. 이때의 Fr 값은 0.54, 0.38 이다.

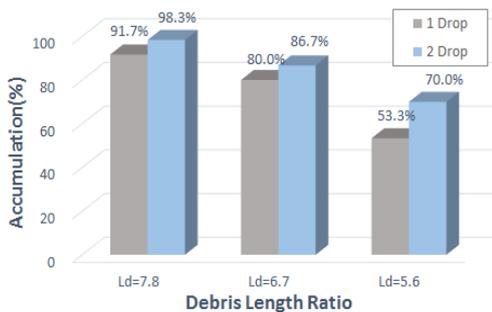
Fig.8은 흐름조건에 따른 유송잡물의 최대집적률을 나타낸 그림으로 Fig. 8(a)와 같이 $Fr=0.54$ 조건에서 투하방법에 상관없이 교각에서의 유송잡물의 집적은 길이가 길수록 집적률이 높게 나타났으며 상대적으로 길이가 짧은 경우 집적률이 낮게 나타나는 것으로 나타났다. 이에 반해 Fig. 8(b)와 같이 $Fr=0.38$ 조건에서는 유송잡물의 집적률이 Fr이 0.54인 경우에 비해 높게 나타나는 것으로 나타났는데 이는 비교적 저유속에서 유송잡물의 유하되는 속도가 낮기 때문에 교각에서의 집적이 수월하기 때문이다. 또한 투하방법에 따른 집적률을 보았을 때 1개 투하 시에 비해 2개 투하 시 집적률이 높게 나타나는 것으로 나타났다. 홍수로 인한 유송잡물의 양을 가늠할 수는 없지만 이와 같이 유송잡물의 양이 많아질 경우 집적이 비교적 쉽게 발생하기 때문에 교각에 큰 영향을 끼칠 수밖에 없다. 따라서 유송잡물은 최대한 교각에 집적되지 않게 하는 것이 최선의 대책일 것이다.

3.2 스유퍼 설치 후

스유퍼는 교각 등에 설치되어 자력으로 회전을 통해 유송잡물의 집적이 이루어지지 않도록 우회시키는 방식의 차단시설이다. 스유퍼를 통한 유송잡물이 어떻게 우회되는지에 대한 설명은 Fig. 9에 나타내었다. 그림과 같이 상류단에서 발생된 유송잡물이 하천을 따라 유하(Fig. 9(a))되면서 스유퍼에 집적이 이루어지면(Fig. 9(b)) 유수력으로 인해 회전하는 스유퍼를 통해 유송잡물의 방향을 전환시키고(Fig. 9(c)) 하류단으로 빠져나가게 된다(Fig. 9(d)).



(a)



(b)



(a)

Fig. 8. Maximum Accumulation Rete According to Froude Number(before installation)
(a) $Fr=0.54$ (b) $Fr=0.38$



(b)



(c)



(d)

Fig. 9. Debris Transportation
 (a) debris transport (b) debris accumulation
 (c) sweeper rotation (d) debris slipped out

스위퍼 설치에 따른 유송잡물 집적실험의 결과는 Table 4 ~ 5에 나타내었다. Table 4는 1개 투하조건에 따른 유송잡물 실험결과를 평균한 값이며, Table 5는 2개 투하조건에 따른 실험결과 값을 나타낸다.

Table 4. Results of Accumulation Test(1 drop)

Time (min)	Fr=0.54			Fr=0.38		
	L _d =7.8	L _d =6.7	L _d =5.6	L _d =7.8	L _d =6.7	L _d =5.6
	N _{avg}					
1	0.00	0.00	0.00	0.67	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.67	0.00	0.00
3	0.33	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00
4	0.33	0.00	0.00	0.67	0.33	0.00
5	1.00	0.00	0.00	0.33	0.67	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.33	0.67	0.00
9	0.33	0.33	0.00	0.67	0.33	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.67	0.00	0.00
11	0.33	0.00	0.00	0.67	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.33	0.33	0.00
13	0.00	0.00	0.00	1.00	0.33	0.00
14	0.00	0.00	0.00	1.00	0.33	0.33
15	0.33	0.00	0.00	1.67	0.33	0.33
16	0.00	0.00	0.00	2.33	0.67	0.33
17	0.00	0.00	0.00	3.00	0.33	0.67
18	0.00	0.00	0.00	2.67	0.33	0.00
19	0.00	0.00	0.00	3.00	0.67	0.00
20	0.00	0.00	0.00	3.33	1.00	0.00

Table 5. Results of Accumulation Test(2 drop)

Time (min)	Fr=0.54			Fr=0.38		
	L _d =7.8	L _d =6.7	L _d =5.6	L _d =7.8	L _d =6.7	L _d =5.6
	N _{avg}					
1	0.00	0.00	0.00	0.67	0.33	0.00
2	0.67	0.00	0.00	2.00	1.00	0.67
3	2.33	0.00	0.00	2.67	1.33	0.00
4	1.33	0.67	0.00	3.00	1.00	0.67
5	0.67	0.00	0.00	2.33	0.67	1.00
6	0.00	0.00	0.00	2.67	1.00	1.00
7	0.67	0.00	0.00	3.33	1.67	0.00
8	1.33	0.33	0.00	3.67	1.00	0.00
9	0.00	0.33	0.00	4.33	1.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	5.00	1.00	0.00

3.2.1 유송잡물 길이에 따른 집적특성

스위퍼 설치에 따른 유송잡물 집적실험은 설치전 조건과 동일하다. 스위퍼 설치에 따른 유송잡물의 집적은 설치전에 비해 상당한 집적률의 차이를 보이고 있는 것으로 나타났다. Fig. 10(a)에서와 같이 단일투하인 경우 L_d가 7.8인 경우 스위퍼에서의 유송잡물 집적률은 17%의 집적률로 나타났으며, L_d가 6.7인 경우 집적률은 5%, L_d가 5.6일 경우 유송잡물의 집적은 발생하지 않았다. 이는 스위퍼의 자력회전으로 하여금 유송잡물이 집적되더라도 회전이 발생함으로써 우회를 유도하기 때문이다.

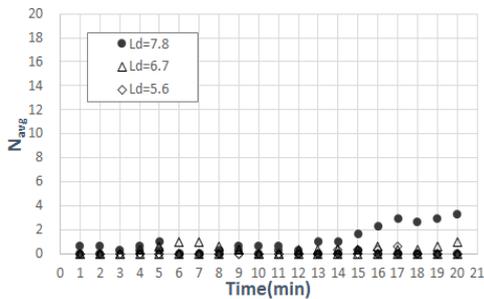
L_d 가 7.8인 경우 유송잡물 집적률이 상대적으로 높게 나타나는 것은 유송잡물의 길이가 증가함에 따라 집적이 쉽게 발생하고 스위퍼에 걸처진 유송잡물에 작용하는 유수력이 증가하기 때문에 스위퍼의 자력회전을 방해하기 때문이다. 그러나 유송잡물의 집적이 추가적으로 발생하면서 힘의 평형이 무너지게 되고 스위퍼의 회전으로 인해 이탈되고 하류로 유하하는 것으로 나타났다. 2개 투하시 유송잡물의 집적량은 1개 투하에 비해 집적률이 높게 나타나는 것으로 확인되었다. Fig. 10(b)와 같이 2개 투하시 L_d 가 7.8인 경우 스위퍼에서의 유송잡물 집적률은 25%, L_d 가 6.7인 경우 8%, L_d 가 5.6인 경우에도 4.4%의 집적이 이루어지는 것으로 나타났다. 2개 투하시 유송잡물의 집적률은 1개 투하에 비해 집적량이 증가하는 것으로 나타났는데 이는 유송잡물이 겹치게 되면서 목본류 표면의 거칠기와 잔가지로 인해 유송잡물이 서로 엉키게 되면서 나타나는 현상으로 확인되었다. 그러나 단일 투하와 마찬가지로 유송잡물의 집적량이 증가할수록 힘의 평형이 무너지면 자력회전으로 인한 스위퍼의 기능으로 집적된 유송잡물은 시간이 지남에 따라 스위퍼에서 이탈되는 것으로 나타났다.

3.2.2 흐름조건에 따른 집적특성

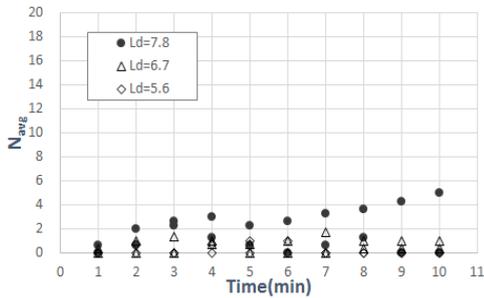
유송잡물 집적실험의 흐름조건은 2가지 경우를 고려하였다. 유량변화를 통해 유속조건을 변화를 주었으며 수위는 일정하게 유지한 조건에서 유량의 변화를 통해 Fr에 따른 영향을 검토하고자 하였다. 이때의 Fr 값은 0.54, 0.38 이다.

유송잡물의 집적량은 투하개수인 20개를 대상으로 지속적인 투하실험이 종료되었을 때 스위퍼에 누적되어 집적된 유송잡물의 개수를 대상으로 집적률을 산정하였다. Fr=0.54 조건에서 투하방법에 상관없이 스위퍼에서의 유송잡물의 집적은 이루어지지 않았다. 그러나 Fr=0.38 조건에서는 유송잡물의 길이비가 6.7인 경우 1개 투하시 16.7%, 2개 투하시 25.0%의 집적률로 나타났으며 길이가 짧아질수록 집적률은 감소하며 길이비가 4.4인 경우 집적은 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 보았을 때 유송잡물의 집적은 현장상황에 따라 다르게 발생할 수도 있지만 Fr이 적은 경우 집적률이 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 유송잡물이 스위퍼에 집적이 이루어질 경우 최대 집적량이 발생하였을 때 집적률을 산정한 결과이다. 그림과 같이 Fr에 관계없이 단일투하에 비해 2개 투하시 집적률이 높아지는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 11(b)와 같이 Fr이 적을수록 집적률이 높아지는 것을 알 수 있다. 또한 유송잡물의 길이비(L_d)가 증가함에 따라 집적률은 상승하고 있으며 1개 투하시 13.3%, 2개 투하시 집적율은 35%로 1개 투하에 비해 2.7배 집적률이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 스위퍼의 저감능력을 대표할 수는 없지만 집적 가능성을 가정한다면 안전율을 고려할 때 유송잡물 길이비에 대한 영향을 고려해야 할 것으로 판단된다.

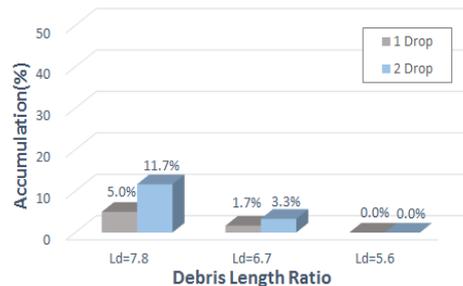


(a)



(b)

Fig. 10. Variations of Debris Accumulation According to Drop Method(after installation)
(a) 1 drop (b) 2 drop



(a)

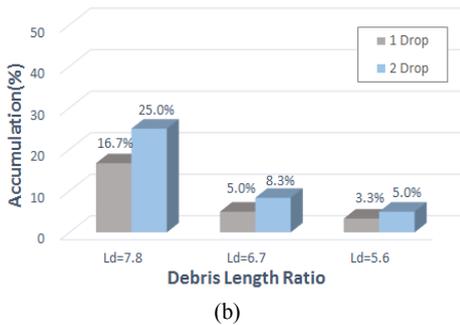


Fig. 11. Maximum Accumulation Rate According to Froude Number(after installation)
(a) Fr=0.54 (b) Fr=0.38

3.3 유송잡물 저감시설 효과분석

유송잡물 집적실험을 통한 저감시설의 효과분석은 스위퍼 설치전·후의 집적률을 대상으로 유송잡물의 길이와 흐름조건에 대해 비교하고자 하였으며 투하방법에 따라 구분하여 분석하였다.

3.3.1 스위퍼 설치 전후 저감효과

유송잡물 길이에 따른 집적률은 유송잡물 길이비(Ld)에 대해 검토하였다. Fig.12 투하방법에 따른 유송잡물

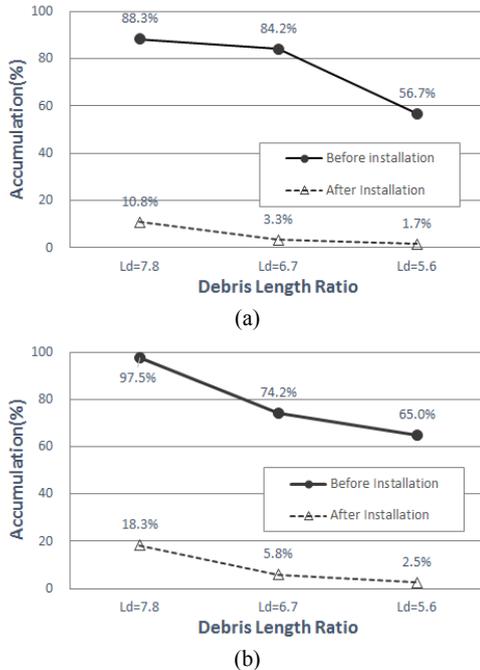


Fig. 12. Accumulation Rate According to Debris Length
(a) 1 drop (b) 2 drop

의 집적률을 비교한 것으로 각각의 자료는 유속에 관계 없이 스위퍼 설치 전·후 유송잡물 길이에 따른 집적률을 평균하였다. 그림과 같이 유송잡물 길이에 따른 집적률은 유송잡물의 길이가 증가할수록 집적률이 높게 나타나며 2개 투하 시 집적률이 높아지는 것으로 나타났다. 그러나 투하방법에 관계없이 스위퍼 설치 시 현저하게 저감된 집적률을 확인할 수 있으며 이를 통해 스위퍼의 저감능력을 확인할 수 있다. 유송잡물의 길이에 따른 집적률은 Table 6에 나타내었다. 1개 투하 시 Ld가 7.8인 경우 총 집적률 대비 77.5%의 저감효과가 있는 것으로 나타났으며 Ld가 6.7, 5.6인 경우 80.8%, 55.0%의 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 2개 투하 시 저감효과는 79.2%, 68.3%, 62.5% 으로 나타났다.

Table 6. Average Accumulation Rate According to Drop Methods

Debris Length Ratio (Ld)	1 Drop		2 drop		1 Drop	2 Drop
	Accumulation(%)				Reduction (before-after) (%)	
	before install -ation	after installa -tion	before install -ation	after installa -tion		
7.8	88.3	10.8	97.5	18.3	77.5	79.2
6.7	84.2	3.3	74.2	5.8	80.8	68.3
5.6	56.7	1.7	65.0	2.5	55.0	62.5

3.3.2 스위퍼 설치에 따른 저감효과

스위퍼 설치 시 흐름조건에 따른 집적률은 Fig. 13과 같다. 그림에서와 같이 유송잡물의 집적률은 1개 투하 시에 비해 2개 투하 시 2.7배 증가하는 것으로 나타났다. 이는 유송잡물이 1개일때에 비해 2개일 때 집적확률이 증가하고 스위퍼에 집적이 이루어지면 걸쳐진 유송잡물은 흐름의 차단면적이 증가하게 되면서 스위퍼의 자력회전능력을 저하시키기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 13(a)는 1개 투하 시 집적률을 나타낸 것으로 Fr이 적을수록 유송잡물의 집적률이 3배 정도 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 13(b)는 2개 투하 시 유송잡물의 집적률을 나타낸 그림으로 1개 투하시와 마찬가지로 Fr이 작을수록 집적률이 2.5배 정도 증가하는 것으로 확인되었다.

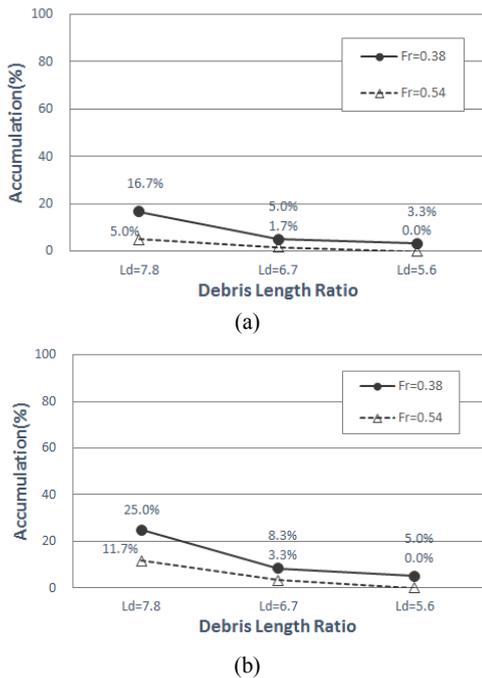


Fig. 13. Accumulation Rate According to Froude Number(after install)
(a) 1 drop (b) 2 drop

4. 결론

본 연구에서는 소교량을 대상으로 유송잡물의 집적을 방지하기 위한 차단시설 중 미연방도로국에서 제안한 스위퍼의 실규모 검증 실험을 수행하였다. 스위퍼는 교각 등에 설치되어 자력으로 회전을 통해 유송잡물의 집적이 이루어지지 않도록 우회시키는 방식의 차단시설이다. 스위퍼의 검증 실험을 위해 소교량 표준단면도를 준용하여 실물크기의 교각모형을 제작하였다. 검증실험은 스위퍼 설치 유무에 따라 2가지 흐름조건, 3가지 유송잡물의 길이 그리고 2가지 투하방법을 통해 집적량을 측정하고 자료 분석을 통해 스위퍼의 저감능력을 검토하고자 하였다. 실험의 결과는 다음과 같다.

1. 유송잡물 집적률은 대부분 유송잡물이 길수록 집적률 높아지는 경향이 있으며, 유속이 적을수록 집적률이 높아지는 것으로 확인되었다. 또한 단일투하보다 2개 투하 시 집적률이 높게 나타나는 것으로 나타났다.
2. 스위퍼 설치 전 유송잡물의 집적률은 1개(단일)투

하 시 56.7% ~ 88.3%로 나타났으며, 2개 투하 시 65.0% ~ 97.5%로 나타났다.

3. 스위퍼 설치 후 유송잡물의 집적률은 1.7% ~ 10.8%로 나타났으며 2개 투하 시 2.5% ~ 18.3%로 나타났다.
4. 스위퍼 설치 후의 저감능력은 1개 투하 시 설치 전에 비해 55.0% ~ 80.8%의 유송잡물이 적게 집적되는 것으로 나타났으며, 2개 투하 시 62.5% ~ 79.2%의 적게 집적되는 것으로 나타났다.
5. 흐름조건에 따른 유송잡물의 집적은 스위퍼 설치 전 영향은 미미한 것으로 나타났으나 스위퍼 설치 후 유송잡물의 집적률은 1개 투하 시에 비해 2개 투하 시 2.7배 증가하고 Fr이 작을수록 집적률이 2.5배 정도 증가하는 것으로 나타났다.

이와 같은 결과로 판단할 때 스위퍼설치에 따른 소교량에서의 유송잡물 저감능력은 우수한 것으로 확인되었다. 따라서 유송잡물 잠재능력이 높은 소하천에 스위퍼를 설치할 경우 유송잡물 집적으로 인한 교량의 안정성 확보 측면에서 유리할 것으로 판단된다. 그러나 스위퍼의 자력회전이 이루어지지 않는 환경(유송잡물의 양, 형태, 재료)에 따라 집적률이 높아질 수 있는 불확실성은 여전히 해결해야 할 문제로 남아 있기 때문에 스위퍼의 저감능력을 극대화하기 위한 연구는 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

References

- [1] Federal Highway Administration, "Debris Control Structures", Federal Highway Administration, U.S.A., pp. 5.1-6.26, 2005.
- [2] AASHTO, "AASHTO Technical Committee on Hydrology and Hydraulics Spring 2007 Meeting Minutes", American Association of State Highway and Transportation Officials, pp. 14-15, 2007.
- [3] P. C. Lagasse, "Effects of Debris on Bridge Pier Scour(NCHRP Report 653)", Washington, D.C.: National Cooperative Highway Research Program, 2010.
- [4] D. A. Lyn, T. J. Cooper, C. A. Condon, L. Gan, "Factors in Debris Accumulation at Bridge Piers" West Lafayette, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5703/1288284313364>
- [5] N. T. Ryan, "River debris:cause, impacts, and mitigation techniques", ACEP, 2011.
- [6] Y. S. Lee, J. W. Cho, "Installation plan of debris control structure on highway, Korean society of civil engineers,

KSCE Conference, pp. 3838-3843, 2004.

- [7] J. S. Lee, "A study on Disaster Management of Small Stream", *Journal of KOSHAM*, vol.7, no.2, pp. 70-80, 2007.
- [8] S. J. Kim, D. J. Jung, J. G. Kang, H. K. Yeo, J. T. Kim, "A study on the Comparison and Analysis of Debris Reduction System on Small Bridge", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol.17, no.3, pp. 31-41, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.3.31>
- [9] National Institute for Disaster Prevention, "A Study on the Standard Design for Small Bridge Crossing Stream", pp. 53-99, NIDP, 2001.

김 성 중(Sung-Joong Kim)

[정회원]



- 2003년 2월 : 상지대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>
수리학, 토목공학

정 도 준(Do-Joon Jung)

[정회원]



- 2011년 2월 : 경일대학교 건설정보공학과 (공학박사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 시설연구사

<관심분야>
수리수문, 방재

강 준 구(Joon-Gu Kang)

[정회원]



- 2002년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 2003년 9월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

<관심분야>
수리학, 토목공학

여 흥 구(Hong-Koo Yeo)

[정회원]



- 2000년 6월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 9월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

<관심분야>
수리학, 토목공학

김 종 태(Jong-Tae Kim)

[정회원]



- 2010년 2월 : 안동대학교 지구환경과학과 (이학박사)
- 2011년 11월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구원

<관심분야>
하천수리학, 수리실험