

교량의 유송잡물 집적을 고려한 추가 여유고 산정식 개발

김성중

한국건설기술연구원 수자원하천연구본부

Development of Additional Freeboard Equations Considering Debris Accumulation in Bridge

Sung-Jung Kim

Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요 약 소교량에서의 대표적인 홍수피해는 교각기초의 세굴, 여유고 부족으로 인한 파괴 등이 알려져 있다. 이와 더불어 유송잡물 집적으로 인한 피해사례가 발생하고 있는데 교량에서의 유송잡물에 대한 피해는 유송잡물 집적으로 인한 교량 전도, 수위상승으로 인한 제방월류, 압력흐름 증가로 인한 하상세굴 등의 피해 등 다양한 피해가 발생하는 것으로 보고되고 있다. 이러한 유송잡물로 인한 피해를 저감하기 방법으로는 유송잡물 차단, 우회시설을 설치하거나 충분한 교량의 여유고를 확보하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 여유고 확보를 위한 수리실험을 계획하였다. 수리실험은 소교량 대상 실규모 유송잡물 집적실험과 집적형태를 반영한 수리특성실험으로 구성하였다. 집적형태를 반영한 수리실험은 개수로 흐름의 유속에 따른 흐름특성을 나타내는 값 중 하나인 프루드 수(Froude Number) 조건에 따라 유송잡물의 폭비(W/a), 높이비(H/a)에 따른 영향을 검토하였다. 이러한 실험결과를 바탕으로 유송잡물을 고려한 Fr 에 따른 여유고 산정식을 개발하여 제시하였다.

Abstract Typical flood damages in small bridges include scour of the pier foundation and destruction due to lack of freeboard. In addition, there are cases of damage caused by the accumulation of debris. The debris on the bridge causes various damage, such as bridge overturning due to the accumulation of debris, river bank overflow due to water level rise, and bed scours due to increased pressure flow. Methods to reduce the damage caused by debris include blocking the debris, installing bypass facilities, or securing freeboard for the bridge. This study performed a hydraulic experiment to secure freeboard for the bridge. The hydraulic experiment consisted of real scale tests on a small bridge and a hydraulic characteristic experiment that reflected the type of accumulation. In the hydraulic experiment reflecting the type of accumulation, the effect of the width ratio (W/a) and height ratio (H/a) of debris under the Froude Number (Fr) conditions was reviewed. These variables and conditions represent the flow characteristics according to the flow velocity of the open channel. Based on these experimental results, freeboard equations were developed according to Fr , considering debris.

Keywords : Small River, Debris, Bridge, Water Level, Freeboard Equations

*Corresponding Author : Sung-Jung Kim(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
email: jinx9482@kict.re.kr

Received October 20, 2021
Accepted December 6, 2021

Revised November 25, 2021
Published December 31, 2021

1. 서론

국내 소하천에 설치된 대표적인 수공구조물은 교량, 보, 암거 등이 있으며, 특히 소교량은 전체 소하천 구조물의 56%를 차지하고 있을 정도로 높은 분포도를 갖고 있다. 소교량의 피해는 태풍 및 집중호우로 인한 교각기초의 세굴, 여유고 부족으로 인한 파괴 등이 대표적인 피해 사례로 알려져 있으며, 이와 더불어 유송잡물 집적으로 인한 피해사례가 종종 발생하고 있다. 소교량에서의 유송잡물로 인해 발생하게 되는 대표적인 피해는 유송잡물의 집적으로 인한 교량전도파괴, 수위상승으로 인한 제방월류, 압력흐름 증가로 인한 하상세굴 등의 피해 등 다양한 피해가 발생하는 것으로 보고되고 있다.

홍수시 교각에 유송잡물 집적으로 인한 유수의 통수능 저감은 증가되는 홍수량을 소화하기 위해서 수위상승을 통한 통수단면을 확보하게 될 것이다. 하천을 횡단하는 교량의 경우 상판 뿐 아니라 교량에 설치된 안전난간 등에 유송잡물이 쉽게 집적되는 경향이 있기 때문에 상판을 월류하는 수위조건에서는 상당한 유수력을 받을 수밖에 없는 상황이 발생하게 되며 교량의 부분적 파괴 또는 전도파괴 등의 심각한 피해를 발생시키게 된다. 또한 기존 제방을 넘는 홍수위가 발생하고 이는 곧 제방붕괴로 이어져 제내지에 심각한 피해를 발생시키게 된다. 이러한 유송잡물로 인한 피해를 저감하는 가장 좋은 방법은 유송잡물을 교각에 집적되지 않도록 하는 것이 가장 중요하다 할 수 있으나 현실은 그렇지 않다. 유송잡물이 교각에 집적된다는 가정하에 가장 우선시 검토되어야 하는 것은 유송잡물 집적에 따른 집적특성을 검토하는 것이고 집적으로 인한 주변에서의 흐름특성을 검토하는 것이 중요하다 할 것이다.

교각의 유송잡물에 대한 연구로 Lukas Schmocker(2011)는 홍수기 하천에서 교량파괴의 원인으로 유송잡물을 지적하였으며, 유송잡물의 집적의 주요 요소로 유송잡물의 제원, 여유고, 흐름특성, 교량의 특성 등을 문제요소로 지적하였다. 이러한 요소들 중 접근유속, 교량특성, 여유고를 주요인자로 설정하고 수리실험을 통해 유송잡물의 차단 확률을 추정할 수 있는 식을 제시하였다[1]. Pina Nicoletta De Cicco(2015)는 유송잡물의 집적과 차단이 홍수피해 관리의 주요문제라 지적하였으며, 유송잡물 집적으로 인한 교각의 형상과 지형적 형태에 초점을 맞추고 이에 대해 개별적인 영향에 집중하여 연구를 수행하였다. 3가지 교각형상과 4가지 수축형태를 갖는 지형적 특성에 대한 연구를 수행하여 차

단물에 대한 결과를 제시하였다[2]. 또한 Muhammad Islamy Rusyda(2015)는 교량과 통나무와의 상호작용에 대한 수리실험을 수행하여 수로내 방해면적이 교량에서 유송잡물의 집적에 결정된다고 하였으며 교량에 집적되는 유송잡물의 양을 예측하는 공식을 제안하였다[3].

국내의 경우 최계운 등(2003)은 교각주위내 유송잡물로 인한 피해원인 검토를 통해 유송잡물 단면적 및 집적각도와의 영향을 검토하여 유송잡물의 집적률의 증가는 상류수위 및 직하류 유속이 비례한다고 하였으며, 특히 유송잡물의 비율이 10 % 이상일 경우 현재 설계기준의 여유고를 초과하는 수위가 발생함을 지적하였다[4]. 임장혁(2001)의 연구에서는 단일교각 세굴특성 실험을 통해 유송잡물 유무에 따른 세굴영향 검토를 수행하고 세굴로부터 교량의 안정성 확보를 위해 충분한 경간장을 확보할 필요가 있다고 하였으며, 특히 유송잡물 유/무에 따른 세굴심도의 차이가 발행하기 때문에 유송잡물을 고려할 경우 보다 넓은 경간장을 확보할 수 있도록 권장하였다[5]. 한국시설안전공단에서 번역하고 소개한 유목과 재해(2013)에서는 유송잡물의 대표적 피해주체인 유목을 대상으로 유목집적으로 인한 피해 메커니즘을 수리실험으로 접근하여 분석하였다. 검토방법은 유목차단의 지배요소, 교량 경간장-상판 하부의 여유고, 유목특성, 차단상향의 관계를 실험적으로 검토하였다[6].

본 논문은 재난안전연구원(2014, 2015)에서 수행된 유송잡물 기반 실물실험 및 수리실험 자료를 바탕으로 작성된 것으로 실제규모의 유송잡물 집적 실험을 통해 유송잡물의 집적특성을 파악하고 이러한 자료를 토대로 유송잡물의 크기변화에 따른 교각주변에서의 흐름특성을 모형실험을 통해 검토하고자 하였다. 결과적으로 실험결과를 토대로 유송잡물 집적을 고려한 교량의 추가 여유고 산정식을 개발하고자 하였다[7,8].

2. 실규모 유송잡물 집적실험

유송잡물 집적형태와 관련된 선행연구는 유송잡물의 추정치를 대상으로 호주와 뉴질랜드에서 크기와 형상에 관련하여 제안되었다. 호주의 경우 유송잡물은 흐름방향에서 교각에 걸친 유송잡물의 형태가 직사각형을 이룬다고 하였으며, 뉴질랜드에서는 유송잡물의 형태가 수심방향으로 뾰족한 역삼각형의 형태를 이룬다고 하였다. 이들 모두는 유송잡물의 최대치를 근거로 하여 추정하였다. 유송잡물의 집적과 관련하여 미국의 NCHRP(2010)에서는

유송잡물의 영향에 대한 연구에서 유송잡물은 단일 유목으로 시작하여 점차적으로 집적량이 많아지며 유송잡물의 집적형상을 이루고 있다고 하였다[9]. 유송잡물은 하천에서는 교량의 경간장이 대체적으로 넓고 교각 상판의 높이가 홍수위를 넘지 않기 때문에 유송잡물로 인한 피해정도는 작다고 할 수 있다. 그러나 중규모 하천이나 소하천에 설치된 교량의 경우는 대상유역의 특성에 따라 피해정도가 크다. 피해를 저감하기 위해서는 유송잡물의 특성에 따른 수리특성검토가 필수적이나 실증실험을 통한 유송잡물의 집적형태에 대한 검토가 전무한 상황이다. 이를 위해 본 연구에서는 초본, 목본, 초본+목본류 혼합의 유송잡물의 집적형태에 대한 실규모 집적실험을 수행하여 유송잡물의 집적형태 및 특성을 파악하였다.

2.1 실험방법 및 조건

실규모 유송잡물 집적실험은 경북 안동에 위치한 하천 실험센터(River Experiment Center, REC) 사행수로에서 실험을 진행하였다. 실규모 실험수로의 경우 유량공급은 최대 $5.0 \text{ m}^3/\text{s}$ (최대)이며 저수로폭은 3.0 m이다. 만제폭은 11.0 m로 설계되었으며 경사도의 경우 1/800이며, 425.0 m의 길이로 구성되어 있다. Fig. 1은 유송잡물 집적실험 대상구간에 대한 현장사진으로 사행도가 1.0인 구간에서 실험을 수행하였다. 수리실험은 소교량 표준단면도에 제시된 실규모 소교량과 동일한 교각모형을 재현하여 실규모 유송잡물 집적실험을 수행하였다.



Fig. 1. Experiment channel and bridge pier(REC, Andong)
(a) Meandering channel, (b) Small river bridge pier

실험대상 유송잡물은 Fig. 2와 같이 초본류, 목본류로 구성되어 있으며, 실험조건은 목본류, 초본류+목본류 혼합재료로 구분하여 실험을 계획하였다. 초본류 및 목본류의 수고는 1.5 m ~ 2.0 m 이내의 재료를 활용하여 실험에 사용하였다.



Fig. 2. Debris sample for accumulation experiments
(a) Herbal plants, (b) Woody plants

2.2 실규모 집적실험

목본류 단일투하시 교각에 집적된 평면형태는 Fig. 3(a)와 같이 평면상 직사각형의 형태로 집적이 이루어지고 있는 것을 알 수 있다. 잔가지가 있는 목본류의 특성상 잔가지끼리 서로 얽히면서 집적면적이 증가되기도 한다. 잔가지가 없는 경우에 비해 집적면적이 증가하고 있으며 잔가지로 인한 유수력의 영향을 잔가지가 없는 경우보다 많이 받아 유송잡물의 형태가 좌우측으로 넓게 연장되는 형상을 갖는 것으로 나타났다. 초본류와 목본류의 혼합재료로 수행된 실험에서는 목본류의 잔가지로 인해 보다 쉽게 초본류가 쉽게 집적되는 것을 알 수 있었다. 목본과 초본이 혼합되어 집적됨으로 인해 목본류만 단일투하 하였을 때 보다는 Fig. 3(b)와 같이 교각의 좌우측으로 집적폭이 증가하고 있는 것으로 나타났다. 잔가지는 유송잡물의 면적이 증가하는 요인이기도 하지만 쉽게 걸리기 쉬운 잔가지의 구조가 영향을 미치는 것으로 이러한 경우 유송잡물의 부피가 크게 증가하는 것으로 나타났다.

유송잡물 연직 집적특성은 아크릴로 제작된 교각내부에서 설치된 카메라를 이용하여 촬영된 영상을 이용하여 검토하였다. 목본류 투하실험결과 유송잡물이 집적됨으로 인해 수면에서 집적된 유송잡물이 교각 전면부에서 발생하는 하강류의 영향으로 인해 바닥쪽으로 미끄러져 내려가는 것으로 확인되었다. 이러한 현상은 일정량의 유송잡물 집적이 발생되면 반복적으로 발생하며 이로 인해 교각에서의 집적두께가 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 4(a)). 혼합투하에 따른 유송잡물은 Fig. 4(b)와 같이 목본류에 걸리거나 덮어진 초본류로 인해 목본류로만 투입하였을 때 보다 틈새가 촘촘히 막혀 통수능이 상당히 저하되고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 목본류 사이에서 발생하는 와류로 인해 초본류가 상당히 엉키는 현상이 관측되었다. 유송잡물 집적이 진행될수록 동일하게 교각 전면부의 하강류의 영향으로 인해 유송잡물의 부피가 점차적으로 증대되는 것으로 나타났다.



Fig. 3. Plan view of debris accumulation test
(a) Woody plants, (b) Herbal+woody plants

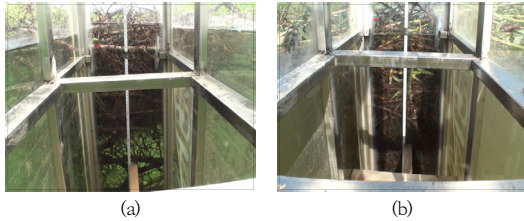


Fig. 4. Vertical view from the inside
(a) Woody plants, (b) Herbal+woody plants

2.3 실험결과

목본류 대상 유송잡물 평면집적형상은 목본류 단일재료만 사용하였을 시 원형보다는 직사각형 형태로 집적이 되는 것으로 나타났다. 초본류+목본류 혼합의 경우 좌우 측에 집적된 초본류의 유송잡물이 유수력에 의해 곡률이 작은 타원형의 형태를 가지고 있는 것이 확인되었다. 초본이 혼합되었을 때에는 목본 단일투하보다 집적형태의 크기가 증가하고 있는 것으로 나타났다. 실제현장에서의 유송잡물은 초본 또는 목본 단일재료가 집적되지는 않으므로 초본과 목본이 혼합된 형태로 집적이 이루어지기 때문에 집적크기가 상당히 증가되어 교각에 많은 영향을 줄 것으로 판단된다. 연직집적높이는 목본 단일재료 투입 시 보다 혼합 투입의 경우 집적높이가 증가하는 것으로 확인되었는데 이는 상대적인 공극비의 차이가 유수력의 차이를 발생시키고 교각전면부의 하강류의 영향을 많이 받기 때문에 집적두께가 증가하는 것으로 판단된다.

3. 유송잡물 크기에 따른 수리특성실험

하천의 하상이 안정되어 유사 이동 또는 하상변동에 의한 영향이 그다지 중요하지 않은 하천흐름의 경우에는 고정상 실험을 수행하게 된다. 고정상 모형이론을 하천모형에 적용할 경우 주요 검토사항은 중력, 점성력, 표면장력 등 힘의 상사, 흐름저항의 상사, 왜곡도 등이다. 개수로 흐름을 지배하는 힘은 중력, 점성력, 표면장력 등이며

이는 각각 Froude 상사, Reynolds 상사, Weber 상사 등으로 모형에서 재현된다. 이 중 중력에 의해서 흐름이 발생하는 개수로 흐름에서는 중력과 관성력의 비로 표시되는 Froude 수의 상사가 만족되어야 한다. 일반적인 하천모형에서 중력비와 유체의 밀도비는 원형과 모형에서 동일하므로 Froude 상사에 의해 축척을 결정할 경우에는 모형의 물리적 성질, 모형의 제작가능성, 비용, 공급 가능한 실험유량 등을 고려하여 결정하게 된다. 축척이 너무 작을 경우에는 축척효과(Scale Effects)로 인한 점성력의 영향으로 인해 모형과 원형의 상사관계가 성립하지 않을 수 있으므로 적절한 규모의 축척을 결정하는 것이 중요하다.

유송잡물 수리실험의 유송잡물 모형은 앞선 실험의 결과를 활용하였다. 나무재질과 같은 유송잡물은 휨성질을 가지고 있어 교각에 집적된 형상은 완벽한 사각형 형태로 나타나지 않는다. 그러나 유송잡물 수리특성실험에서는 유송잡물로 인한 안정성 확보차원에서 안전율을 고려하여 직사각형으로 가정하고 수리특성을 검토하였다. 유송잡물의 크기는 Fig. 5와 같이 폭(W), 높이(H)로 정의되며, 교각의 폭은 (a)로 정의하였다. 실험을 통해 계측되는 특성인자는 유입부 유속(U) 및 축선별 수위(h) 등이 있다.

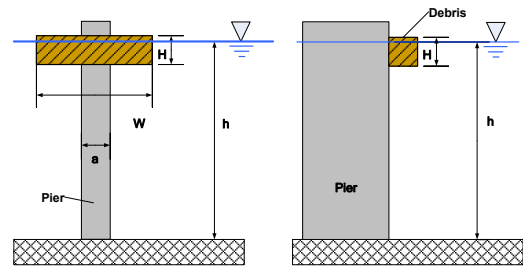


Fig. 5. Definition of debris experiment parameters

3.1 실험방법 및 조건

유송잡물 집적에 따른 수리실험은 폭 1.5 m, 길이 20.0 m, 높이 1.0 m의 제원을 갖는 직선수로에서 수행하였다. 실험수로에 공급 가능한 최대공급유량은 $0.26 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며, 수로중앙의 10.0 m 구간은 벽체가 강화유리로 설치되어 수위변화 및 유황관측이 용이하도록 설치되어 있다. 수리실험에 사용되는 모형교량은 소교량 표준단면도를 참조하여 1/5의 축척을 갖는 모형교량을 제작하였다. Fig. 6은 모형교각의 제원 및 수로에서 설치된 모형교각을 나타내는 그림이다.

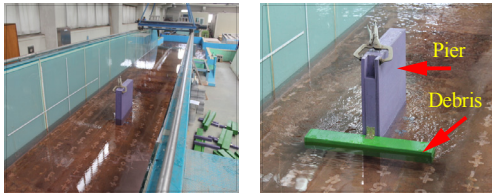


Fig. 6. Experiment channel and debris model

유송잡물 모형은 목본류 대상 실험결과를 토대로 형상화된 직사각형 형태의 집적형태를 가정하였으며 이를 통해 유송잡물의 폭변화(W/a), 높이변화(H/a)를 고려하여 실험을 계획하였다.

Froude number(이하 " Fr ")에 따른 수위변화는 유송잡물의 집적높이(H)변화에 따른 상승효과를 검토하기 위해 3가지 높이변화(교각폭의 0.5배 ~ 1.5배 집적)에 대한 실험과 유송잡물의 폭(W)변화에 대해 6가지 폭변화(교각폭의 5배 ~ 10배)에 따른 수위변동을 검토하였다. 실험의 유량조건은 실제하천에서는 홍수기간 중이라 하더라도 사류흐름이 발생하는 경우가 극히 드물기 때문에 Table. 1과 같이 사류흐름이 발생하지 않는 4가지 유량

Table 1. Experimental conditions for debris tests

No.	Discharge (Q , m^3/s)	Pier width (a , m)	Debris Specification			
			Height (H , m)	Height ratio (H/a)	Width (W , m)	Width ratio (W/a)
H0W0*	0.05 0.10 0.15 0.20	0.09	-	-	-	-
H5W5			0.045	0.5	0.45	5
H5W6					0.54	6
H5W7					0.63	7
H5W8					0.72	8
H5W9					0.81	9
H5W10					0.90	10
H10W5			0.09	1.0	0.45	5
H10W6					0.54	6
H10W7					0.63	7
H10W8					0.72	8
H10W9					0.81	9
H10W10					0.90	10
H15W5			0.15	1.5	0.45	5
H15W6					0.54	6
H15W7					0.63	7
H15W8					0.72	8
H15W9					0.81	9
H15W10					0.90	10

* experiment number "H0W0" means that height ratio(H/a) 0, width ratio(W/a) 0

조건을 선정하였다. 유송잡물로 인한 수위측정은 교각의 상류부 끝단 지점으로부터 상류방향으로 5.0 m 지점까지 1.0 m간격으로 포인트게이지를 사용하여 수위변동을 관측하였다. 유속측정은 유입부에서의 유속을 1차원 유속계를 사용하여 측정하였다.

3.2 유송잡물 크기에 따른 수리실험

3.2.1 높이비와 Fr 에 따른 수리특성실험 분석

Fr 변화에 따른 상류단에서의 수위변화 검토는 유송잡물의 집적높이 변화에 따른 영향을 검토하기 위한 것으로 유송잡물의 높이는 교각폭을 기준으로 교각폭의 0.5배, 1배, 1.5배 집적을 가정하였으며, 유송잡물의 폭은 교각폭의 5배 ~ 10배 집적을 가정하여 실험을 수행하였다. 실험은 하류단 수위를 일정하게 유지시킨 상태에서 유량공급량의 변화를 통해 수위변동을 계속하였다 (Fig. 7).

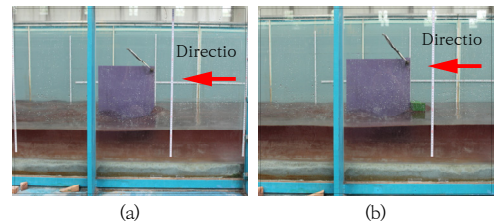


Fig. 7. Debris model experiments

(a) $Fr=0.48$, H0W0, (b) $Fr=0.48$, H5W5

전반적으로 Fr 이 점차적으로 증가할수록 교각전면부 차단으로 인한 배수위가 상류단까지 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 수위상승 영향은 Fr 이 0.49일 경우 유송잡물 집적전에 비해 최대 7 %의 수위상승을 유발하는 것으로 확인되었다. 이와 같은 결과로 보았을 때 유송잡물의 높이와 Fr 은 교각 상류단에서의 수위상승을 유발하는 인자로 확인할 수 있는 것으로 확인할 수 있다. 모든실험 조건에서 관측한 결과 유송잡물의 높이비가 0.5(H5 series)인 경우 유송잡물 집적전(H0 series)과 비교하였을 때 Fr 에 따른 수위상승 영향은 미미한 것으로 나타났는데 이는 유송잡물로 인해 차단된 면적이 상류단 수위를 변화시킬 만큼의 통수단면에 지배적인 영향을 미치지 못하는 것으로 판단할 수 있다.

3.2.2 폭비와 Fr 에 따른 수리특성실험 분석

Fig. 8은 Fr 변화에 따른 유송잡물의 폭비(W/a)의 상관관계를 나타내기 위해 도시한 그래프이다. Figs. 8(

a)~8(d)는 유송잡물 높이비(H/a)가 0.5일 경우 폭비변화에 따른 수위변동을 나타낸 것으로 유송잡물의 높이비는 0.5 이하일 경우 유송잡물의 폭이 교각두께의 10배 이하일 경우 Fr 증가에 관계없이 수면형의 거의 일치하고 있는 것으로 나타났다. 이는 유송잡물이 일정높이 이하일 경우 폭이 증가하더라도 상류단에서의 추가적인 수면상승을 발생시키지 않는 것을 의미한다. Figs. 8(e)~8(h)는 유송잡물 높이비(H/a)가 1.0일 경우 폭비변화에 따른 수위변동을 나타낸 것으로 Fr 이 증가함에 따라 수위변동의 영향이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 폭비 증가에 따라 수위상승영향이 나타나며, Fr 이 0.49인 경우 유송잡물 집적전 수위상승에 5 %의 추가적인 수위상승이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 Fr 이 0.15 이하인 경우 유송잡물로 인한 수위상승영향이 나타나지 않는 것으로 나타났다. Figs. 8(i)~8(l)은 높이비(H/a)가 1.5일 경우 폭비변화에 따른 수위변동을 나타낸 것으로 Fr 증가에 따라 차이나는 수면형이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 점차적으로 증가하며 Fr 이 0.49일 경우 유송잡물 집적전 수위에 비해 21 %의 추가적인 수위상승이 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같은 실험결과로 보았을 때 유송잡물의 집적은 정량적인 한계 즉, 높이비가 0.5 이하일 경우 수위상승에 대한 영향은 미미하고 높이비가 1.0 이상일 경우 유송잡물에 대한 영향이 나타나며 또한 폭비 증가에 따라 수위가 상승하는 것으로 나타났으나 폭비변화에 대한 증가보다는 높이비 증가가 수위상승에 지배적인 영향인자로 작용하고 있음을 알 수 있다.

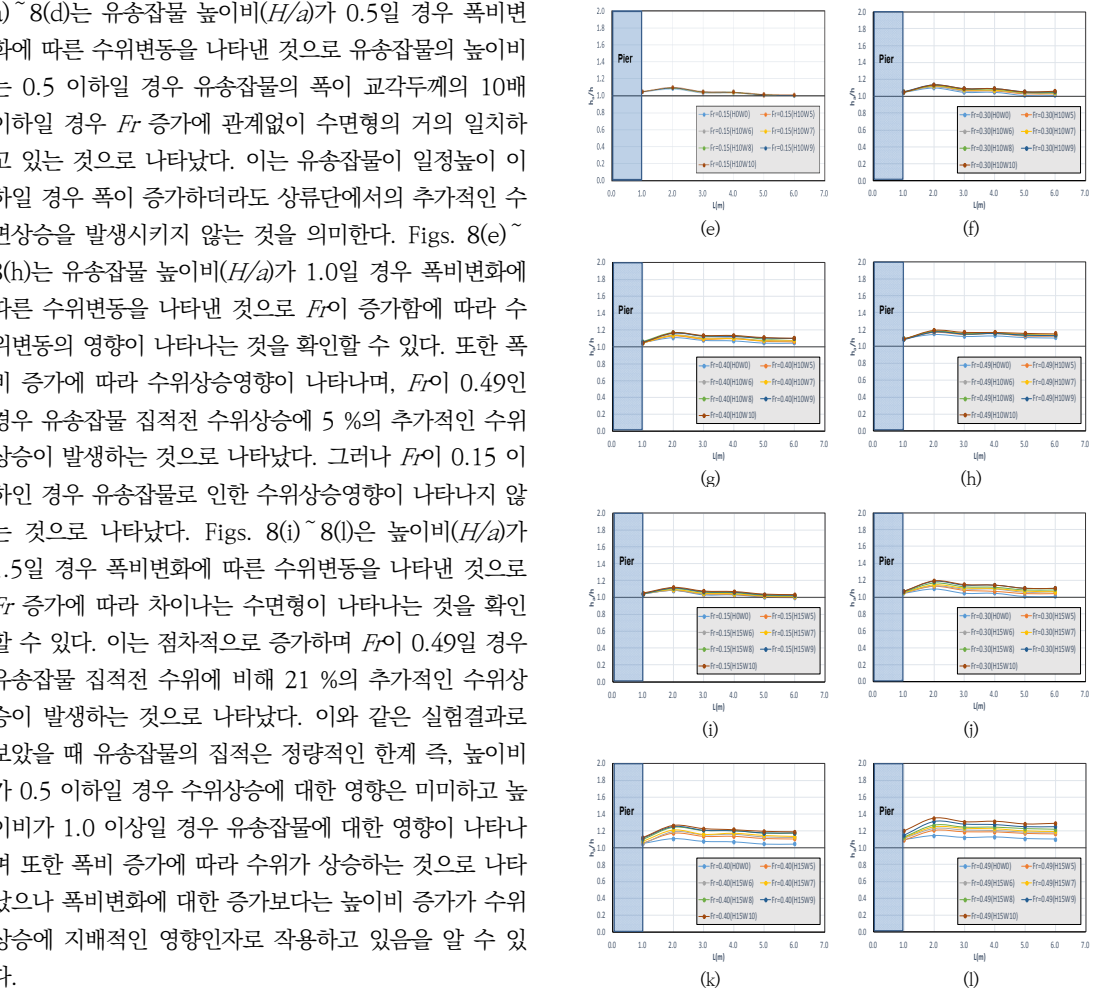


Fig. 8. Water level around the pier according to Fr and H/a

(a) $Fr=0.15$, $H/a=0.5$, (b) $Fr=0.30$, $H/a=0.5$, (c) $Fr=0.40$, $H/a=0.5$, (d) $Fr=0.49$, $H/a=0.5$, (e) $Fr=0.15$, $H/a=1.0$, (f) $Fr=0.30$, $H/a=1.0$, (g) $Fr=0.40$, $H/a=1.0$, (h) $Fr=0.49$, $H/a=1.0$, (i) $Fr=0.15$, $H/a=1.5$, (j) $Fr=0.30$, $H/a=1.5$, (k) $Fr=0.40$, $H/a=1.5$, (l) $Fr=0.49$, $H/a=1.5$

3.3 실험결과

Fr 에 따른 수리실험결과는 Table. 2 와 같다. 유송잡물로 인한 수심은 h_a 로 표현하였으며, 교각으로부터 1.0 m 직상류에 위치해 있다. h_s 는 교각으로부터 10.0 m 이 격된 유입부에서 측정된 수심을 나타낸다.

Table 2. Variation of water depth ratio

(a) Height ratio(H/a) 0

Fr	No.	Height ratio	Width ratio	Water depth ratio
		H/a	W/a	h_a/h
0.15	H0W0	0	0	1.08
0.3	H0W0	0	0	1.09
0.4	H0W0	0	0	1.11
0.49	H0W0	0	0	1.14

(b) Height ratio(H/a) 0.5

Fr	No.	Height ratio	Width ratio	Water depth ratio
		H/a	W/a	h_a/h
0.15	H5W5	0.5	5	1.09
0.15	H5W6		6	1.09
0.15	H5W7		7	1.08
0.15	H5W8		8	1.09
0.15	H5W9		9	1.09
0.15	H5W10		10	1.08
0.28	H5W5	0.5	5	1.09
0.28	H5W6		6	1.09
0.28	H5W7		7	1.09
0.28	H5W8		8	1.09
0.28	H5W9		9	1.1
0.28	H5W10		10	1.1
0.39	H5W5	0.5	5	1.11
0.39	H5W6		6	1.11
0.39	H5W7		7	1.11
0.39	H5W8		8	1.11
0.39	H5W9		9	1.11
0.39	H5W10		10	1.11
0.48	H5W5	0.5	5	1.14
0.47	H5W6		6	1.14
0.47	H5W7		7	1.15
0.47	H5W8		8	1.16
0.47	H5W9		9	1.15
0.47	H5W10		10	1.16

(c) Height ratio(H/a) 1.0

Fr	No.	Height ratio	Width ratio	Water depth ratio
		H/a	W/a	h_a/h
0.15	H10W5	1.0	5	1.09
0.15	H10W6		6	1.09
0.15	H10W7		7	1.09
0.15	H10W8		8	1.09
0.15	H10W9		9	1.09
0.15	H10W10		10	1.10
0.28	H10W5	1.0	5	1.11
0.27	H10W6		6	1.11
0.27	H10W7		7	1.12
0.26	H10W8		8	1.13
0.26	H10W9		9	1.13
0.26	H10W10		10	1.13
0.38	H10W5	1.0	5	1.13
0.37	H10W6		6	1.14
0.37	H10W7		7	1.14
0.35	H10W8		8	1.17
0.35	H10W9		9	1.16
0.34	H10W10		10	1.17
0.46	H10W5	1.0	5	1.17
0.46	H10W6		6	1.18
0.45	H10W7		7	1.18
0.46	H10W8		8	1.18
0.45	H10W9		9	1.18
0.44	H10W10		10	1.19

(d) Height ratio(H/a) 1.5

Fr	No.	Height ratio	Width ratio	Water depth ratio
		H/a	W/a	h_a/h
0.15	H15W5	1.5	5	1.09
0.15	H15W6		6	1.09
0.15	H15W7		7	1.09
0.15	H15W8		8	1.11
0.14	H15W9		9	1.11
0.14	H15W10		10	1.12
0.27	H15W5	1.5	5	1.13
0.26	H15W6		6	1.13
0.25	H15W7		7	1.14
0.24	H15W8		8	1.17
0.23	H15W9		9	1.19
0.23	H15W10		10	1.19
0.34	H15W5	1.5	5	1.18
0.33	H15W6		6	1.19
0.32	H15W7		7	1.21
0.31	H15W8		8	1.24
0.31	H15W9		9	1.25
0.30	H15W10		10	1.26
0.43	H15W5	1.5	5	1.21
0.41	H15W6		6	1.23
0.41	H15W7		7	1.25
0.39	H15W8		8	1.27
0.37	H15W9		9	1.31
0.36	H15W10		10	1.35

유송잡물의 크기변화에 따른 Fr 와 수위상승비(h_a/h)와의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 여기서 Fig. 9(a)는 유송잡물의 높이비가 $H/a=0.5$ 일 때 Fr 에 따른 수위영향을 나타낸 그림으로 유송잡물 폭변화에 따른 수위영향은 Fr 이 증가할수록 높아지며 수위는 최대 1.16배 증가하는 것으로 나타났으나 유송잡물 폭변화에 따른 수위상승비는 집적전에 비해 미미하며 최대 1.02배 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 9(b)는 유송잡물의 높이비가 $H/a=1.0$ 일 때 Fr 에 따른 수위영향을 나타낸 그림으로 유송잡물의 폭변화에 따른 수위영향은 Fr 이 증가할수록 높아지며 수위는 최대 1.19배 증가하는 것으로 나타났으며, 유송잡물 폭변화에 따른 수위상승비는 집적전에 비해 최대 1.04배 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 9(c)는 유송잡물의 높이비가 $H/a=1.5$ 일 때 Fr 에 따른 수위영향을 나타낸 그림으로 유송잡물 폭변화에 따른 수위영향은 Fr 이 증가할수록 높아지며 수위는 최대 1.35배 증가하는 것으로 나타났으며, 유송잡물 폭변화에 따른 수위상승비는 집적전에 비해 최대 1.18배 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향을 바탕으로 유송잡물의 높이비(H/a)에 따른 Fr 와 수위상승비와의 관계를 Table. 4와 같이 수위상승에 따른 여유고 산정식으로 제시하였다.

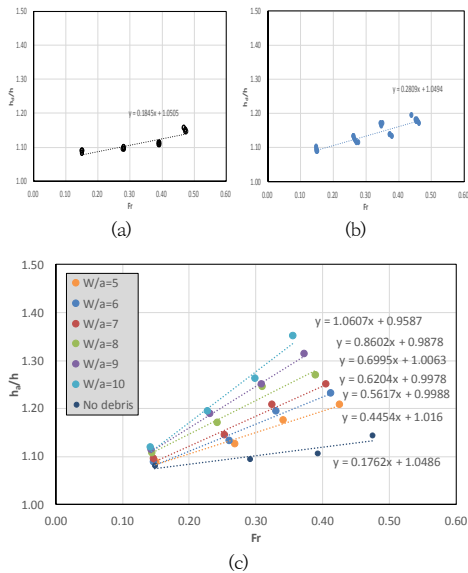


Fig. 9. Relationship of Fr and water level ratio(h_a/h)
(a) $H/a=0.5$, (b) $H/a=1.0$, (c) $H/a=1.5$

Table 4. Water level rising equations by froude number

Freeboard Equations		
$h_a/h = 0.1845 \times Fr + 1.0505$	$W/a = 5 \sim 10$	$0 < \frac{H}{a} \leq 0.5$
$h_a/h = 0.2809 \times Fr + 1.0494$		$0.5 < \frac{H}{a} \leq 1.0$
$h_a/h = 0.4454 \times Fr + 1.0160$	$W/a=5$	$1.0 < \frac{H}{a} \leq 1.5$
$h_a/h = 0.5617 \times Fr + 0.9988$	$W/a=6$	
$h_a/h = 0.6204 \times Fr + 0.9978$	$W/a=7$	
$h_a/h = 0.6995 \times Fr + 1.0063$	$W/a=8$	
$h_a/h = 0.8602 \times Fr + 0.9878$	$W/a=9$	
$h_a/h = 1.0607 \times Fr + 0.9587$	$W/a=10$	

여기서, h_a 는 유송잡물 집적시 교각직상류 수위(m), h 는 유송잡물 집적전 교각직상류 수위(m), W 는 유송잡물의 폭방향 길이(m), H 는 유송잡물의 높이(m), a 는 교각폭(m)을 의미한다.

본 연구결과는 유송잡물 집적이 빈번하게 발생하는 하천에 적용되어야 할 것이다. 이는 현장조사를 통해서 이루어져야 하는데 행정안전부에서는 소규모 공공시설 위험도 평가 기준에서 재해유발 가능성 점검표의 세부사항에 유송잡물로 인한 위험도 지표가 제시되어 있다. 따라서 이러한 지표와 본 논문에서 제시한 추가 여유고 산정식을 활용한다면 홍수로 인한 국부적인 수위상승 예측과 더불어 교량 및 제방의 여유고 설계에서 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 실제 교량의 여유고에 추가되어 적용된다면 현재 국내 수많은 교량은 여유고 확보를 위해 경제적으로 매우 부적절하고 현실적이지 않은 대안을 마련해야 할 수도 있다. 최근 들어 재해에 대한 안전이 중요시되면서 유송잡물로 인한 잠재적 피해요소를 간과하고 지나칠 문제는 아닐 것이다. 이러한 측면에서 본 연구결과를 활용한다면 실제 현장에서의 위험성 여부를 판단을 통해 대책(유송잡물 저장시설, 관리방안 등)마련을 위한 지표로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 홍수로 인한 교량에서의 유송잡물 집적으로 인한 교량의 피해를 저감하기 위하여 유송잡물의 크기예 따른 여유고 산정에 도움을 주고자 수행한 연구이다. 유

송잡물의 영향으로 인한 교량에서의 여유고 산정을 위한 실험은 Fr조건 변화에 따른 수위변화 검토를 통해 유송잡물 집적량에 따른 수위상승의 영향정도를 검토하고 이를 통해 교량에서의 추가 여유고 확보에 대한 산정식을 제안하고자 하였다.

Fr에 조건에 따른 유송잡물의 집적높이에 따른 상승 효과(h_a/h)를 검토하기 위해 유송잡물의 높이변화 ($H/a=0.5\sim1.5$)에 대한 영향과 유송잡물의 폭변화 ($W/a=5\sim10$)에 따른 수위변동을 검토하였고 이로 인한 결과는 다음과 같다.

- ① 유송잡물 집적으로 인한 수위영향은 높이비(H/a)가 0.5 이하일 경우 수위상승에 대한 영향은 미미하고 높이비가 1.0 이상일 경우 유송잡물에 대한 영향이 나타나는 것을 확인하였다.
- ② 유송잡물 높이비가 0.5, 1.0 이하일 경우 유송잡물 폭비(W/a)의 영향은 미미하여 각각의 조건에 따른 실험식을 제시하였다.
- ③ 유송잡물 높이비가 1.5 이상일 경우 폭에 따른 수위상승 효과가 나타나며, 이를 통하여 폭비(W/a) 조건에 따른 추가 여유고 산정식을 제시하였다.

References

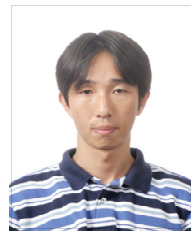
- [1] Lukas Schmocker, Willi H. Hager, "Probability of Drift Blockage at Bridge Decks," *J. hydr. Eng.* Vol.137, No.4, pp.470-479, 2011.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000319](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000319)
- [2] Pina Nicoletta De Cicco, "Flume Experiments on Bridge Clogging by Woody Debris: The Effect of Sharp of Piers," *IAHR proceeding*, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4630.6648>
- [3] Muhammad Islamy Rusyda, "Log jams at a bridge with a pier and a bridge without pier," *Procedia Engineering*, 125, pp277-283, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/i.proeng.2015.11.040>
- [4] G. W. Choi, K. H. Kim, Y. S. Park, "Changes in Water Depth and Velocity by Debris around Piers," *J of Korea Water Resources Association*, vol.36, no.2, pp.273-284, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.3741/jkwra.2003.36.2.273>
- [5] J. H. Im, "Characteristics of Local Scour by Bridge Span Length and Debris Accumulation," Master's thesis, Hongik University, pp.43-60, 2001.
- [6] Korea Infrastructure Safety Corporation, Woody Debris and Disaster, CIR, pp.132-146, 2013.
- [7] H. K. Yeo, "Establishment of empirical experiment and mid and long term strategy for damage reduction

of facilities," National Disaster management research institute, Korea, pp.11-48, 2014.

- [8] J. G. Kang, "A Study on Empirical Experiment for Damage Reduction of Facilities," National Disaster management research institute, Korea, pp.35-97, 2015.
- [9] Federal Highway Administration, "Effects of Debris on Bridge Pier Scour", National Cooperative Highway Research Program(NCHRP) report 653, pp.58-63, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.17226/22955>

김 성 중(Sung-Jung Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 상지대학교 토목공학과 (학사)
- 2003년 2월 : 상지대학교 토목공학과 (석사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

하천공학, 하천방재