

소규모배수로의 흐름상태를 고려한 저감시설의 설치기준 연구

Study on Installation Standards of Reduction Facilities considering Flow Condition of Small Drainage

송영석* · 주진걸** · 김하룡*** · 정상만**** · 박무중*****

Song, Youngseok*, Joo, Jingul**, Kim, Hayong***, Jeong, Sangman****, and Park, Moojong*****

Abstract

While drainage installed in mountainous and urban areas play various roles for supplying and draining water, the standards for reduction facilities and maintenance are insufficient. In the case of small drainage, if there is an inflow of deposited debris, overflow damage occurs due to lack of water supply capacity. In this study, a reduction facility was developed to block the transport of debris in a small drainage. The equation considering installation standards was proposed by analyzing capture efficiency through hydraulic experiment. By establishing various experimental conditions, a total of 900 experiments were conducted using 90 different conditions. The reduction effect of reduction facilities was analyzed by consideration of flow conditions such as discharge and Froude Number. Multiple regression analysis was conducted to develop an equation that considers the installation standard of a small drainage. The dependent variable was capture efficiency, and the independent variables were discharge, Froude Number, and an effective cross sectional area of reduction facilities. The equation considering installation standard of small drainage is $E = 1.337 - 5.074 \times Q - 0.156F_r - 132.710A$ and the significance is high. The results of this study are expected to be applied to reduction facilities suitable for target capture efficiency targeting small drainage.

Key words : Small Drainage, Debris, Reduction Facilities, Capture Efficiency, Hydraulic Experiment

요 지

산지지역, 도시지역 등에 설치된 배수로의 물의 공급 및 배수를 위한 다양한 역할을 하지만 저감시설이나 유지관리에 대한 기준은 미흡한 실정이다. 소규모배수로의 경우 유입되는 유송잡물이 퇴적되면 통수능력부족에 따라 월류피해가 발생한다. 본 연구에서는 소규모배수로의 유송잡물 차단을 위한 저감시설을 개발하고 수리실험을 통해 포착효율을 분석하여 설치기준을 고려한 산정식을 제안하였다. 다양한 실험조건을 수립하여 총 90조건, 900회의 실험을 실시하였으며 유량, Froude Number 등의 흐름상태를 고려한 저감시설의 저감효과를 분석하였다. 소규모배수로의 설치기준을 고려한 산정식을 개발하기 위해 다중회귀분석을 실시하였다. 종속변수는 포착효율이며 독립변수는 유량, Froude Number, 저감시설의 한 칸의 유효단면적을 적용하였다. 소규모배수로의 설치기준을 고려한 산정식은 $E = 1.337 - 5.074 \times Q - 0.156F_r - 132.710A$ 이며 유의성은 높은 것으로 분석되었다. 본 연구의 결과는 소규모배수로를 대상으로 목표 포착효율에 적합한 저감시설의 적용은 가능할 것으로 예상된다.

핵심용어 : 소규모배수로, 유송잡물, 저감시설, 포착효율, 수리실험

*정회원, 대구공업대학교 토목조경과 조교수(E-mail: kind711@hanmail.net)

Member, Assistant Professor, Civil Engineering and Landscape Architectural, Daegu Technical University

**정회원, 동신대학교 토목환경공학과 부교수(E-mail: jgjo@dsh.ac.kr)

Member, Associate Professor, Department of Civil Environmental Engineering, Dongshin University

***정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 건설환경연구실 책임연구원(E-mail: civilkhy@kongju.ac.kr)

Member, Assistant Fellow, Department of Construction Environment Research Land & Housing Institute

****정회원, 공주대학교 건설환경공학부 교수(E-mail: smjeong@kongju.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

*****교신저자, 정회원, 한서대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-70-8238-5646, Fax: +82-41-660-1119, E-mail: mjpark@hanseo.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Hanseo University

1. 서론

배수로는 강우발생시 물이 흐르는 배수를 위해 설치하는 구조물로서 농촌지역, 산지지역, 도시지역 등 다양한 분야에서 사용되고 있다(Zhu et al., 2016). 다양한 지역에서 물의 공급 또는 배수를 안정적인 유량을 통과시키기 위하여 배수로를 이용하고 있다. 이러한 배수로의 경우 주변의 나뭇가지, 낙엽, 돌, 모래 등의 유송잡물이 유입되어 퇴적이 발생한다. 배수로의 유송잡물 유입에 따른 퇴적은 통수능력부족으로 월류피해를 유발시키는 주요원인이 되며 이러한 피해는 대규모배수로보다는 소규모배수로에서 주로 피해가 발생한다. 그러나 이러한 피해에도 불구하고 배수로의 유송잡물을 저감하는 저감시설이나 유지관리 등에 대한 정량적인 기준은 부족한 실정이다.

배수로에 대한 연구는 수리실험과 수치모델링을 통한 매개변수별 흐름의 특성이나 유량의 변화를 연구하였다. 수리실험을 통해 배수로의 유량, 노면경사, 횡경사, 그리고 지역상수를 고려하여 경험적 유량 산정식을 제안하고 차집 유량의 변화를 분석하였다(Wong, 1994; Wong and Moh, 1997). 수로로 유입되는 유량의 지형특성을 고려한 부등류 해석을 실시하고 저감시설 등의 설치에 대한 안전성을 검토하였다(Ku and Jun, 2008; Liu et al., 2013). 배수로관련 연구는 수리실험과 수치모델링을 이용한 유량의 변화와 흐름의 특성을 검토하는 연구가 대부분 수행되었다. 소규모 배수로로 유입되는 유송잡물의 퇴적을 차단하는 저감시설은 개발되지 않았다. 또한, 대부분 대규모 배수로에 대한 수리실험이 대부분으로 소규모배수로에 대한 연구나 흐름 상태에 따른 영향의 연구는 수행되지 않았다.

유송잡물은 크기나 형태의 정량적인 정의가 어려워 대부분의 선행연구는 수리실험을 통한 퇴적특성이나 설계방법 등이 연구되었다. 하천에서 유송잡물이 교량 및 암거에 퇴적되는 것을 저감하기 위한 저감시설 등의 설계방법이나 유송잡물 크기에 따른 수리학적 특성을 제시하였다(Dasika, 1995; Hager and Del Giudice, 1998; Johnson et al., 2001; Meselhe and Hebert, 2007; Schmocker and Hager, 2011, 2013; Chin, 2013; Guven et al., 2013). 유송잡물의 차단시설에 대한 포착효율을 실험하여 저감효과를 관측하거나 마찰계수 등의 수리학적 변화에 대한 효과를 분석하였다(Shields and Gippel, 1995; Braudrick and Grant, 2000; Manga and Kirchner, 2000; Wallerstein et al., 2002; Manners et al., 2007). 또한, 유송잡물의 집적정도를 분석하거나 교량에 말뚝을 설치하여 유송잡물의 차단과 세굴저감에 대한 효과를 실험을 통해 제시하였다(Jun et al., 2006; Schmocker and Hager, 2011, 2013). 기존 선행연구에서는 산사태 발생으로 유송잡물에 퇴적을 차단하기 위한 저감시설이나 수리학적 특성을 연구하였으나 대부분 대규모 시설에 대한 연구일 뿐 소규모배수로에서 유송잡물 저감을 위한 저감시설의 개발은 연구되지

않았다.

유송잡물관련 대부분의 연구는 하천의 통수능력부족을 저감하기 위한 교각의 개수, 경간장의 길이, 교각폭 등의 홍수피해가 발생하지 않는 기준을 제안하였다(Melville and Dongol, 1992; Gippel, 1995; Kim et al., 2007). 교량뿐만 아니라 암거를 대상으로 유송잡물을 고려한 수리학적 특성을 분석하여 설계조건을 제시하였다(Meselhe and Hebert, 2007; Guven et al., 2013). 다양한 연구에도 불구하고 하천 및 도로에 대한 설계기준에서 유송잡물을 차단하기 위한 다양한 연구의 필요성을 제안하였다(Choi et al., 2003). 유송잡물의 연구는 다양한 구조물에서 퇴적을 저감하기 위한 설계기준을 제안하거나 연구의 필요성을 제안하고 있다. 그러나, 소규모배수로에 대한 연구는 유송잡물의 저감시설 개발이나 수리학적 특성은 연구되지 않았다.

본 연구에서는 소규모배수로를 대상으로 흐름상태를 고려한 저감시설의 설치기준을 위한 산정식을 개발하고자 한다. 소규모배수로의 저감시설은 다양한 유량과 흐름상태에 따라 유송잡물의 차단효과가 다르기 때문에 수리실험을 통해 영향을 분석하고자 한다. 또한, 소규모배수로의 경우 다양한 지역에 설치되기 때문에 흐름상태가 안정한 상류흐름에 설치된다면 보다 높은 저감효과가 나타날 것이라고 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 소규모배수로에 대하여 저감시설의 저감효과 특성과 흐름상태에 따른 영향을 고려하여 설치기준을 고려한 산정식을 개발하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 유송잡물의 차단시설

배수로로 유입되는 유송잡물의 차단시설은 2005년에 Federal Highway Administration (FHWA)에서 차단시설의 구조물에 대하여 제시를 하였다(Bradley et al., 2005). 배수로로 유입되는 유송잡물의 차단시설은 스크린과 우회 스크린의 구조물이 제시되었으나 설계기준에 대한 내용은 우회 스크린에 대해서만 제시되어 있다. FHWA에서 제안하는 배수로의 유송잡물 차단시설은 스크린이나 격자 형식의 구조물로 설계되어 있다. 배수로로 유입되는 유송잡물을 차단하기 위해 배수로 크기보다 높고 배수로 폭보다 작은 스크린 또는 격자의 간격으로 설계를 제안하고 있다(Fig. 1). 유송잡물은 유목이나 돌 등으로 구분할 수 있으나 크기와 규모에 대한 정량적인 기준을 정의하기 어렵다. 따라서, 유송잡물의 차단시설은 스크린과 격자의 형태로 유송잡물을 저감하는 구조물을 설계하고 있다.

2.2 Froude Number

Froude Number는 흐름의 중력에 대한 비 혹은 흐름의 평균유속에 대한 표면파의 전파속도의 비이다. 수리학에서 개수로 흐름의 유속에 따른 흐름 특성을 나타내는 값 중의

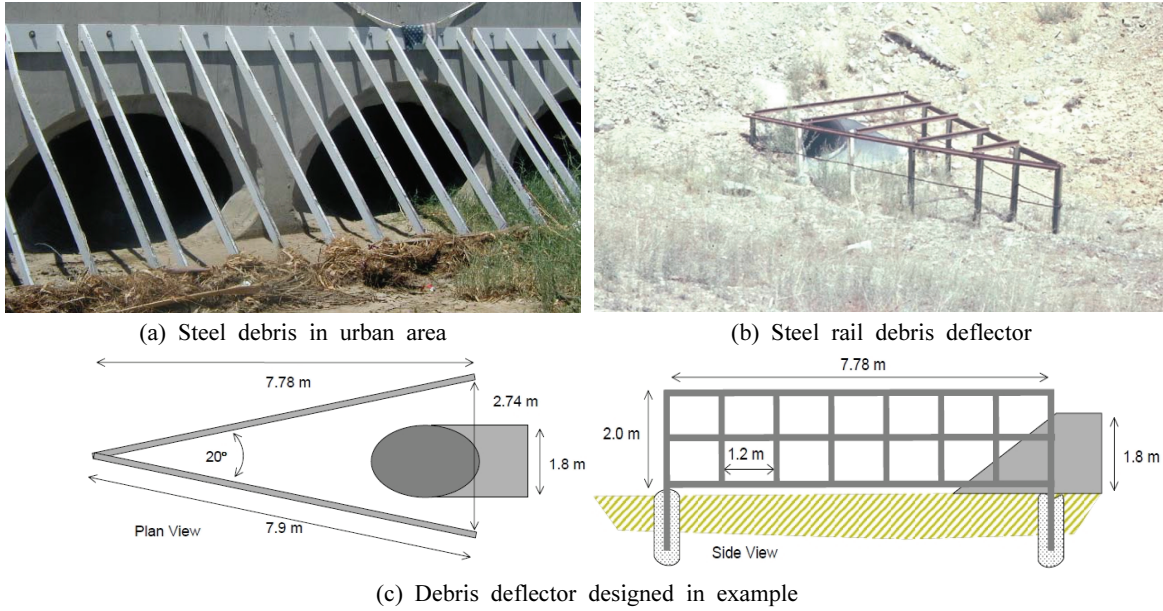


Fig. 1. Debris Reduction Facility (FHWA)

하나로서 Froude Number에 따라 흐름을 상류, 사류, 한계류로 구분하며 Eq. (1)과 같다.

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$

여기서, h 는 수로 단면의 평균수심, g 는 중력가속도, v 는 평균유속

Froude Number가 1일 때의 수심을 한계수심이라고 하며 비에너지가 최소가 되어 흐름의 상태가 한계류(Critical flow)가 되어 흐름의 평균유속이 표면장파의 전파속도와 동일하다. 흐름의 수심이 한계수심보다 크면 $F_r > 1$ 이 되어 흐름의 상태는 사류(Supercritical flow)의 흐름이 발생되며 평균유속이 커지면서 표면장파가 상류로 전파되지 못하고 하류로 전파되어 내려간다. 사류의 흐름의 한계수심(h_c)은 $h < h_c$, 한계유속(v_c)는 $v > v_c$, 한계경사(I_c)는 $I > I_c$ 와 같다. 수심이 한계수심보다 작으면 $F_r < 1$ 이 되어 흐름의 상태는 상류(Subcritical flow)가 되어 흐름의 평균유속이 표면장파보다 작아 표면장파가 상류로 전달된다. 상류의 흐름의 한계수심(h_c)은 $h > h_c$, 한계유속(v_c)는 $v < v_c$, 한계경사(I_c)는 $I < I_c$ 와 같다.

2.3 다중회귀분석(Multiple Regression Analysis)

다중회귀분석(Multiple Regression Analysis)은 수집된 자료의 분석을 통해서 추출된 모집단이 가진 특징이나 모집단의 현상을 추정 및 예견하는 추정기법이다. 주된 목적은 독립변수의 값을 지정했을 때의 종속변수가 갖는 값의 정확한 추정에 있다. 다중회귀분석은 독립변수가 2개 이상이고,

종속변수가 1개로 변수들 사이에 1차 함수의 직선관계를 방법으로 Eq. (2)와 같다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i + \varepsilon \quad (2)$$

여기서, X 는 독립변수, Y 는 종속변수이고, ε 는 상수, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i$ 는 회귀계수를 의미한다.

추정된 다중회귀분석의 유효성과 주어진 자료들에 대한 대표성 및 정확도를 검토하는 것은 중요하다. 다양한 측정방법 중 다중회귀분석의 정도를 특정하는 방법으로 결정계수(Coefficient of Determination)인 R^2 와 분산팽창계수(Variance Inflation Factor)인 VIF가 적용된다. 결정계수는 Explained Sum of Squares (SSE)와 Residual Sum of Squares (SSR)의 합계인 Total Sum of Squares (SST)와 SSE의 비율로서 Eqs. (3)~(6)과 같은 방정식을 적용하여 산정된다.

$$R^2 = 1 - \frac{SSR}{SST} \quad (3)$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (4)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (5)$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n u_i^2 \quad (6)$$

여기서, Y_i 는 i 번째 종속변수, \bar{Y} 는 Y_i 의 평균이며, u_i 는 회귀분석의 오차이다.

3. 수리실험

3.1 실험장치 및 저감시설

소규모배수로의 유송잡물 유입을 차단하는 저감시설의 개발과 포착효율의 성능을 평가하기 위해 수리실험을 실시하고자 한다. 소규모배수로의 수리실험은 수리학적 특성을 가장 잘 확인할 수 있는 원형크기의 1:1 scale에 대하여 배수로와 유량순환시설을 구축하였다. 수리실험실은 소규모배수로의 크기인 300 mm × 300 mm에 충분한 유량공급이 가능한 펌프를 설계하였으며 유량을 안정적으로 공급할 수 있는 고가수조와 정류수조, 저감시설이 설치되는 배수로, 물이 저장되는 저류수조에 대하여 순환공급이 가능하도록 설계하였다(Fig. 2).

수리실험실은 Water Tank → Pump Facilities → Head Tank → Rectifying Tank → Small Drainage → Return Tank로 구성되어 있으며 가로 17.5 m × 세로 17.5 m로 약 100평(306.25

m²)의 규모로 구성되었다. 수리실험실의 저류되어 있는 물의 용량은 약 114 m³로 펌프의 최대공급 유량을 약 5분정도 유지할 수 있는 용량으로 설계하였다. 소규모배수로는 가로 0.4 m × 세로 0.4 m × 길이 8.75 m로 수리실험을 통한 상류단과 하류단의 영향이 흐름에 영향을 없도록 설정하였다. 수리실험실의 시설별 제원은 Table 1과 같다.

수리실험은 소규모배수로로 유입되는 유송잡물을 차단하는 저감시설의 설치기준을 제안하고자 한다. 저감시설별로 유송잡물을 차단하는 포착효율을 분석하여 저감시설의 격자크기에 따른 성능을 평가하고자 한다. 소규모배수로의 유송잡물을 차단하는 저감시설은 22절의 유송잡물 차단시설을 참고하여 수리실험실에 설치가 가능한 구조로서 4 × 4 저감시설, 5 × 5 저감시설, 6 × 6 저감시설을 Fig. 3과 같이 개발하였다. 4 × 4 저감시설은 가로가 4칸, 세로가 4칸으로 총 16칸, 5 × 5 저감시설은 가로가 5칸, 세로가 5칸으로 총 25칸, 6 × 6 저감시설은 가로가 6칸, 세로가 6칸으로 총 36칸으로 설계하였다.

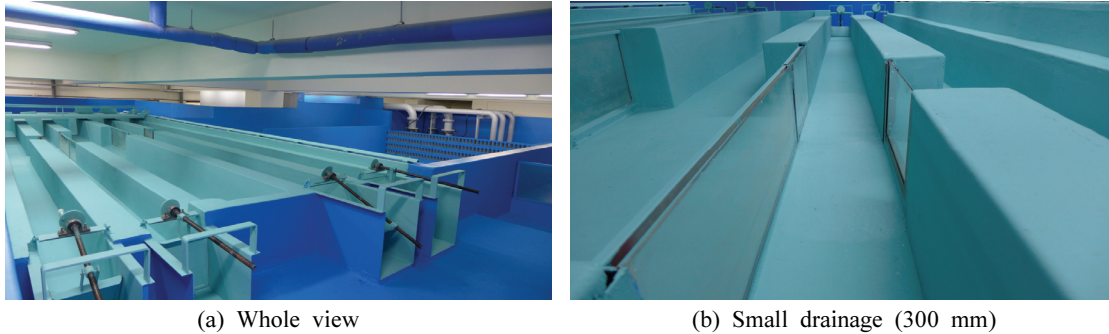


Fig. 2. Hydraulic Lab for Small Drainage

Table 1. Specifications of Laboratory Facilities

Facilities	Dimension (Width×Depth×Height)	Capacity
Water Tank	11 m × 6.85 m × 0.7 m	52.8 m ³
Pump Facilities	15 HP × 2, 10 HP × 1	0.33 m ³ /s
Head Tank	4 m × 6 m × 2 m	48.0 m ³
Rectifying Tank	5 m × 4 m × 0.7 m	14.0 m ³
Small Drainage	0.4 m × 8.75 m × 0.4 m	1.4 m ³
Return Tank	14 m × 1.5 m × 0.2 m	4.2 m ³

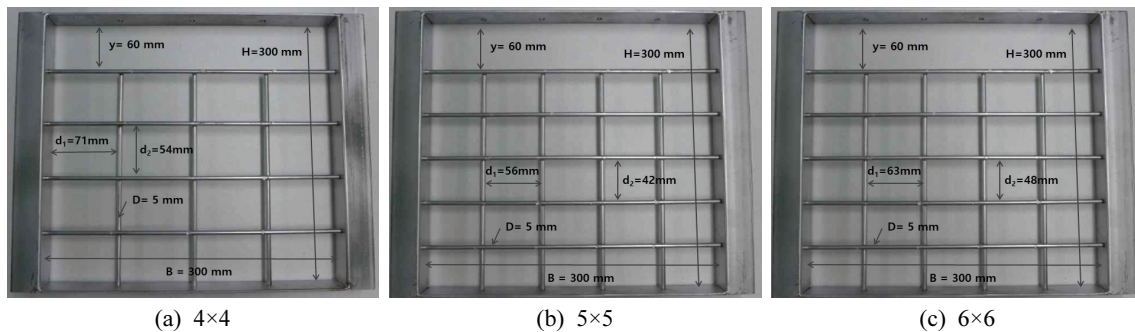


Fig. 3. Reduction Facilities for Small Drainage

저감시설은 유송잡물의 크기를 고려하여 수평순간격과 수직순간격을 고려하여 3개를 개발하였다. 3개의 저감시설은 소규모배수로 폭과 월류고의 높이는 동일하며 유송잡물을 저감하는 격자의 크기가 4 × 4, 6 × 6, 8 × 8로 구분하였으며 제원특성은 Table 2와 같다. 저감시설의 격자는 직사각형이며 유송잡물의 직경과 길이를 고려한 간격을 설정하였다. 소규모배수로 인근에 위치한 유송잡물의 최대 직경은 25 mm, 최소 길이가 90 mm로 유송잡물이 수직으로 통과할 수 있는 최대의 수직간격과 수평간격으로 포착할 수 있는 최소 순간격을 산정하여 적용하였다. 소규모배수로의 4 × 4 저감시설은 수평순간격이 96 mm, 수직순간격이 75 mm, 유효단면적이 7,200 mm², 6 × 6 저감시설은 수평순간격이 63 mm, 수직순간격이 48 mm, 유효단면적이 3,024 mm², 8 × 8의 저감시설은 수평순간격이 46 mm, 수직순간격이 35 mm, 유효단면적이 1,610 mm²와 같다.

3.2 실험조건

소규모배수로의 수리실험조건은 저감시설, 유속, 수심, 유송잡물 투하조건을 고려하여 저감시설의 성능을 평가하고자 한다. 소규모배수로의 크기인 300 mm를 기준으로 저감시설 4 × 4, 5 × 5, 6 × 6로 3 Case, 유속조건은 0.3 m/s, 0.6 m/s, 0.9 m/s, 1.2 m/s, 1.5 m/s, 1.8 m/s로 6 Case, 수심은 60 mm, 90 mm, 120 mm, 150 mm, 180 mm로 5Case이며 수평투하 5회, 수직투하 5회로 총 수평투하 450회, 수직투하 450회로 900회에 대한 실험을 계획하였다. 소규모배수로의 저감시설은 흐름방향의 수직형태로 설치되어 있다. 유송잡물의 경우 길이가 120 mm로 저감시설에 도달하는 방향에

따라 포착효율의 영향이 미칠 것으로 예상된다. 유송잡물의 투하조건을 흐름방향과 동일한 수평방향과 흐름방향의 수직방향으로 나누어 실험조건을 수립하고자 한다. 소규모배수로의 수리실험조건에 대한 내용은 Table 3과 같다.

수리실험에서 사용될 유송잡물은 소규모배수로 인근에서 채집한 유송잡물을 사용하는 것이 제일 좋으나 다양한 실험조건에 동일한 규격의 유송잡물을 적용하기에는 한계점이 있다. 따라서, 본 실험에서는 재료의 확보가 용이하고 유송잡물과 유사한 원형봉을 직경의 크기에 따라 적용하고자 한다. 수리실험에서 1회 투하하는 유송잡물의 양은 저감시설에서 월류수위를 제외한 전체 유효단면적의 50%인 35,800 mm²의 해당하는 면적에 대하여 유송잡물을 산정하였다. 유송잡물의 구성은 3 mm가 9개, 5 mm가 8개, 7 mm가 8개, 10 mm가 8개, 12 mm가 8개로 총 41개를 Table 4와 같이 구성하였다.

4. 실험결과

4.1 소규모배수로의 저감시설 성능평가

소규모배수로에 유송잡물을 차단하는 저감시설 3조건, 유속 6조건, 수심 5조건의 90조건에 대하여 유송잡물 유입특성 2조건의 10회씩 총 900회의 수리실험을 실시하였다. 수리실험조건에 따른 유량범위는 0.054 m³/s에서 0.037 8m³/s, Froude Number의 범위는 0.226 ~ 2.347, 포착효율의 범위는 9.072% ~ 98.997%가 관측되었다. 4 × 4 저감시설에 대한 포착효율은 평균 48.47%, 최소 9.07%에서 최대 91.60%가 관측되었으며 유량조건의 크기에 따라 약 80%의 성능범

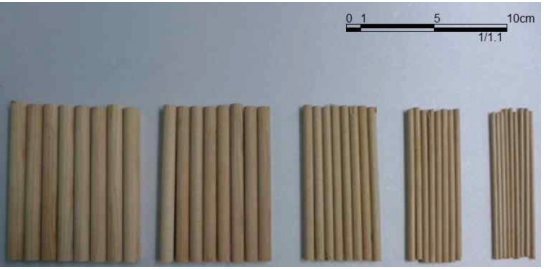
Table 2. Specification of Reduction Facility

Agricultural Drainage (B)	Overflow Height (y)	Reduction Facility	horizontal net distance (d ₁)	vertical net distance (d ₂)	Effective Cross-sectional Area (A)
300 mm	60 mm	4 × 4	71 mm	54 mm	3,834 mm ²
		6 × 6	56 mm	42 mm	2,352 mm ²
		8 × 8	46 mm	35 mm	1,610 mm ²

Table 3. Conditions of Hydraulic Experiment

Small Drainage (mm)	Reduction Facility	Velocity (m/sec)	Depth (mm)	No. of Debris Drops
300	4 × 4 grid 5 × 5 grid 6 × 6 grid	0.3	60	Horizontal drop conditions: 5 count Vertical drop condition: 5 count (1 drop of debris = 41 pieces, ø 3 mm ~ ø 12 mm in diameter)
		0.6	90	
		0.9	120	
		1.2	150	
		1.5	180	
		1.8		
Number of experiment runs			Horizontal drop conditions : 450 Vertical drop condition : 450	

Table 4. Specification of Debris for Hydraulic Experiment

Length (mm)	Diameter (mm)	Count	Effective Cross sectional Area (mm ²)	Debris
120	3	9	3,240	
	5	8	4,800	
	7	8	6,720	
	10	8	9,600	
	12	8	11,520	
Sum		41	35,880	

위가 Fig. 4와 같이 관측되었다. 5 × 5 저감시설에 대한 포착효율은 평균 69.14%, 최소 34.71%에서 최대 99.00%가 관측되었으며 유량조건의 크기에 따라 약 60%의 성능범위가 관측되었다. 6 × 6 저감시설에 대한 포착효율은 평균 78.28%, 최소 51.13%에서 최대 97.12%가 관측되었으며 유량조건의 크기에 따라 약 40%의 성능범위가 관측되었다. 저감시설에 대한 유송잡물의 포착효율은 최대 약 90% 이상의 성능이 확인되었으나 포착효율의 범위는 한 칸의 유효단면적이 작아질수록 감소하는 것으로 관측되었다.

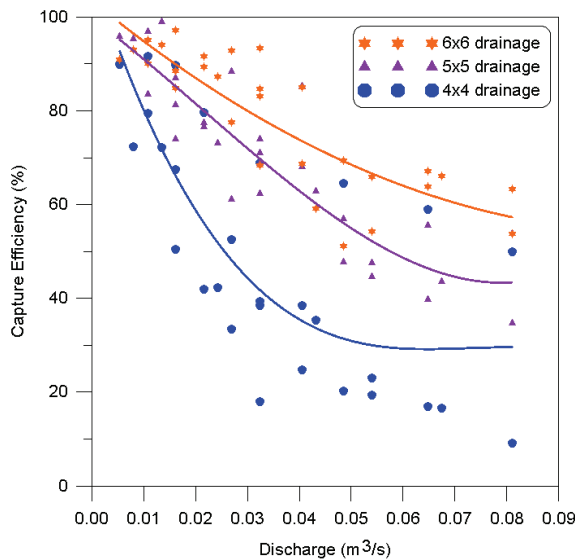


Fig. 4. Capture Efficiency of Reduction Facility

소규모배수로에 저감시설을 설치한다면 구조물에 영향에 따라 흐름상태가 안정화 된다면 유송잡물의 포착효율은 증가될 것으로 예상된다. 소규모배수로에서 유입되는 유량의 크기가 상류조건이라면 안정화된 흐름으로 유송잡물의 포착효율이 증가할 것이며 사류조건이라면 흔들리는 유량의 유입으로 유송잡물의 포착효율이 감소할 것이다. 따라서, 저감시설에 대한 유량별 포착효율의 관계를 흐름상태의 영향을 확인할 수 있는 Froude Number의 조건으로 분석하였

다. Froude Number의 조건은 $F_r < 1$ 의 조건인 상류조건과 $F_r > 1$ 의 조건인 사류조건에 대하여 포착효율을 box plot 그래프로 Fig. 5와 같이 분석하였다.

Froude Number가 1보다 작은 상류 조건에서 4 × 4 저감시설의 포착효율은 23.08%에서 91.60%의 범위로 1사분위는 50.50%, 중앙값은 66.70%, 3사분위는 79.64%가 관측되었다. 5 × 5 저감시설의 포착효율은 44.65%에서 99.00%의 범위로 1사분위는 70.99%, 중앙값은 80.37%, 3사분위는 95.32%가 관측되었다. 6 × 6 저감시설의 포착효율은 54.26%에서 97.12%의 범위로 1사분위는 85.08%, 중앙값은 90.47%, 3사분위는 93.35%가 관측되었다. Froude Number가 1보다 큰 사류 조건에서 4 × 4 저감시설의 포착효율은 9.07%에서 67.43%의 범위로 1사분위는 17.98%, 중앙값은 24.83%, 3사분위는 39.3%가 관측되었다. 5 × 5 저감시설의 포착효율은 34.70%에서 81.23%의 범위로 1사분위는 47.49%, 중앙값은 61.12%, 3사분위는 67.98%가 관측되었다. 6 × 6 저감시설의 포착효율은 51.13%에서 89.38%의 범위로 1사분위는 63.34%, 중앙값은 66.05%, 3사분위는 77.59%가 관측되었다.

4.2 소규모배수로의 설치기준을 고려한 산정식 개발

소규모배수로에 유송잡물의 유입특성에 따른 저감시설에 대한 포착효율을 수리실험을 통해 관측하였다. 실험조건에 대한 저감시설별 유량조건과 Froude Number에 대하여 포착효율을 분석하였다. 소규모배수로에 설치되는 저감시설은 유역면적이나 설치위치에 따라서 유량조건과 목표 포착효율에 대한 유송잡물 차단을 위한 저감계획에 적합한 저감시설이 설치되어야 한다. 수리실험을 수행한 3조건에 대한 저감시설의 경우 다양한 유량조건에 대하여 포착효율과 흐름상태에 따른 상류조건과 사류조건에서의 포착효율을 제시하였다. 따라서, 본 연구에서는 소규모배수로에 대하여 유송잡물 포착을 위한 저감시설을 설치하기 위한 포착효율의 산정식을 개발하였다.

소규모배수로의 설치기준을 고려한 산정식을 개발하기 위해 다중회귀분석을 실시하였다. 매개변수로는 포착효율,

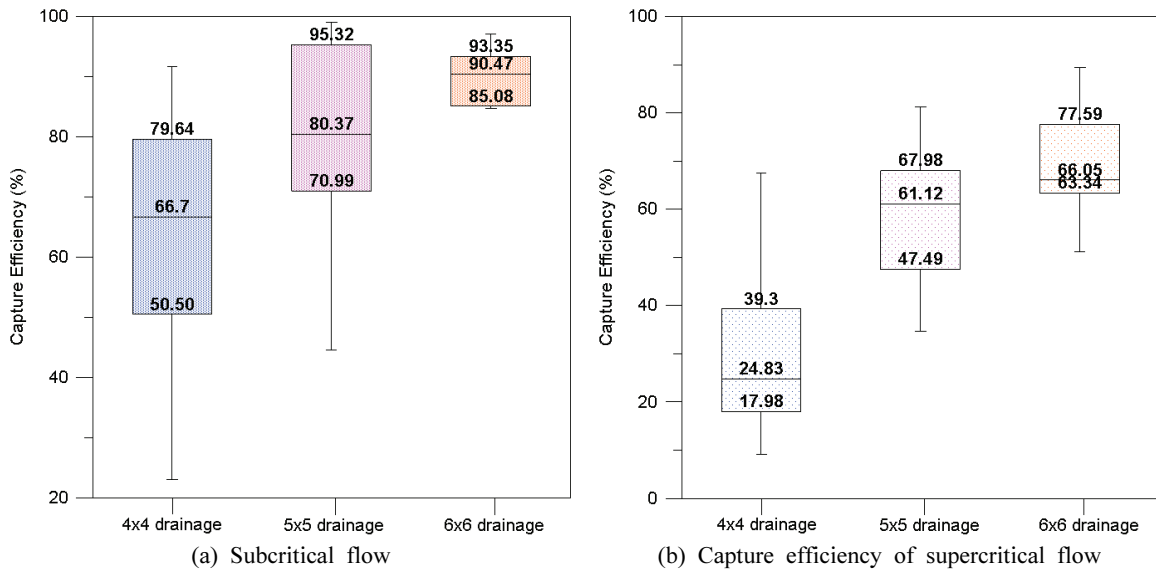


Fig. 5. Characteristics of Capture Efficiency considering Froude Number

Table 5. Multiple Regression Analysis for Installation standard of Small Drainage

Model Summary			
R	R Square	Ajusted R Square	Std. Error of the Estimate
0.906a	0.821	0.815	0.102

a. Predictors: (Constant), Capture Efficiency, Discharge, Froude Number, Effective Cross-sectional Area

ANOVAa					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	4.156	3	1.385	131.466	0.000b
Residual	0.906	86	0.11		

a. Dependent Variable: Capture Efficiency

b. Predictors: (Constant), Discharge, Froude Number, Effective Cross-sectional Area

Coefficientsa						
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	VIF
	B	Std. Error	Beta			
(Constant)	1.337	0.039		34.170		
Discharge	-5.074	0.513	-0.507	-9.899	0.794	1.260
Froude Number	-0.156	0.022	-0.361	-7.047	0.794	1.260
Effective Cross-sectional Area	-132.710	11.704	-0.517	-11.339	1.000	1.000

a. Dependent Variable: Capture Efficiency

유량, Froude Number, 저감시설의 한 칸의 유효단면적을 선정하였다. 소규모배수로의 설치기준을 고려한 산정식의 종속변수는 포착효율이며 독립변수는 유량, Froude Number, 저감시설의 한 칸의 유효단면적을 적용하여 다중회귀분석을 분석하였다. 소규모배수로의 설치기준을 고려한 산정식의 다중회귀분석 결과는 Table 5와 같이 산정되었다. 산정식에

대한 수정된 R²의 값은 0.815로 가뭄 피해액에 대한 4개의 변수들은 81.5%의 높은 설명력을 가지고 있는 것을 분석되었다. 또한, 종속변수와 3개의 독립변수에 대한 F = 131.466, 유의수준도 0.05보다 작은 Sig = 0.000으로 소규모배수로의 설치기준을 고려한 산정식의 활용에 유의성이 상당히 높은 것으로 분석되었다.

소규모배수로의 설치기준을 고려한 산정식에 대한 종속 변수와 독립변수의 각 매개변수별 회귀계수 및 다중공선성 지표가 분석되었다. 독립변수에 대한 변수별 회귀계수는 t-검정을 통한 유의수준이 -11.339%~34.170%로 유의한 것으로 나타났다. 또한, 다중공선성은 독립변수의 상관관계를 나타내는 것으로 VIF 값이 1.000~1.260으로 10 미만이 분석되어 독립변수에 대한 다중공선성은 유의한 수준으로 분석되었다. 소규모배수로의 설치기준을 고려한 산정식은 Eq. (7)과 같다.

$$E = 1.337 - 5.074 \times Q - 0.156F_r - 132.710A \quad (7)$$

여기서, E (Capture Efficiency)는 포착효율, Q (Discharge)는 유량, F_r 은 Froude Number, A는 유효단면적

5. 결론

본 연구에서는 소규모배수로를 대상으로 유송잡물 유입에 따른 저감시설을 개발하고 수리실험을 통해 흐름상태를 고려한 소규모배수로의 설치기준을 위한 산정식을 개발하였다. 소규모배수로의 유송잡물 유입을 포착하는 저감시설은 FHWA와 선행연구를 고려하여 300 mm × 300 mm의 소규모배수로를 대상으로 격자의 형태로 설계하였다. 설계시 유송잡물의 포착에 따른 월류피해를 저감하기 위해 소규모배수로 상단에 약 20%에 해당하는 60 mm에 월류고를 확보하였다. 수리실험을 위한 유송잡물은 다양한 실험조건에 동일한 규격의 유송잡물을 적용하기 위하여 원형봉을 직경의 크기에 따라 적용하였다. 실험조건을 저감시설 3조건, 유속 6조건, 수심 5조건, 투하방법 2조건씩 10회로 총 90조건에 900회의 실험을 실시하였다.

소규모배수로의 유송잡물을 차단하는 저감시설의 포착효율은 저감시설의 크기에 따라 포착효율의 범위는 다르지만 최소 9.072%에서 최대 98.997%의 포착효율이 관측되었다. 소규모배수로의 포착효율은 저감시설의 한 격자의 크기의 단면이 작아질수록 최소 포착효율이 4 × 4 저감시설은 9.07%, 5 × 5 저감시설은 34.71%, 6 × 6 저감시설은 51.13%로 20%~30%가 증가하였으며 최대 포착효율은 90% 이상으로 관측되었다. 또한, 저감시설의 경우 소규모배수로에 설치되는 구조물로서 유량의 흐름상태가 상류와 사류일 때의 포착효율의 변화를 분석하였다. $F_r < 1$ 의 조건인 상류조건에서는 저감시설의 차이에 따라 box plot 그래프에서 중앙값이 66.70%~90.47%, $F_r > 1$ 의 조건인 사류조건에서는 중앙값이 24.83%~66.05%로 상류조건에서 높은 포착효율이 분석되었다.

소규모배수로의 설치기준을 고려한 산정식을 개발하기 위해 포착효율, 유량, Froude Number, 저감시설 한 칸의 유효단면적을 고려하여 다중회귀분석을 통해 산정식을 개

발하였다. 산정식의 종속변수는 포착효율이며 독립변수는 유량, Froude Number, 저감시설의 한 칸의 유효단면적을 적용하여 $E = 1.337 - 5.074 \times Q - 0.156F_r - 132.710A$ 을 개발하였다. 소규모배수로의 설치기준을 고려한 산정식의 R^2 의 값은 0.815, 종속변위와 3개의 독립변위에 대한 $F=131.466$, 유의수준도 0.05보다 작은 $Sig = 0.000$, t-검정을 통한 유의수준이 -11.339%~34.170%, 다중공선성은 VIF 값이 1.000~1.260으로 산정식의 활용에 유의성이 상당히 높은 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 소규모배수로의 유송잡물의 유입을 차단하는 저감시설을 제안하고 포착효율과 흐름상태를 고려한 산정식을 개발하였다. 수리실험을 통한 유송잡물 적용의 한계점과 저감시설이 다양하지 못하는 한계점은 있지만 소규모배수로를 대상으로 목표 포착효율에 적합한 저감시설의 적용은 가능할 것으로 예상된다. 향후연구로는 소규모배수로로 유입되는 토사와 유송잡물을 혼합한 연구와 저감시설의 설치방향에 대한 연구를 수행한다면 보다 실용성 높은 저감시설의 활용이 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지능형 도시수자원 관리사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (2019002950003).

References

- Bradley, J.B., Richards, D.L., and Bahner, C.D. (2005). *Debris control structures: Evaluation and countermeasures* (3rd ed.). Washington DC, USA: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Braudrick, C.A., and Grant, G.E. (2000). When do logs move in rivers? *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 2, pp. 571-583.
- Chin, D.A. (2013). Hydraulic analysis and design of pipe culverts: USGS versus FHWA. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 139, No. 8, pp. 886-893.
- Choi, G.W., Kim, G.H., and Park, Y.S. (2003). Changes in water depth and velocity by debris around piers. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 2, pp. 273-284.
- Dasika, B. (1995). New approach to design of culverts. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 121, No. 3, pp. 261-264.
- Gippel, C. (1995). Environmental hydraulics of large woody debris in streams and rivers. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 121, No. 5, pp. 388-395.

- Guven, A., Hassan, M., and Sabir, S. (2013). Experimental investigation on discharge coefficient for a combined broad crested weir-box culvert structure. *Journal of Hydrology*, Vol. 500, pp. 97-103.
- Hager, W.H., and Del Giudice, G. (1998). Generalized culvert design diagram. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 124, No. 5, pp. 271-274.
- Liu, J., Nakatani, K., and Mizuyama, T. (2013). Effect assessment of debris flow mitigation works based on numerical simulation by using Kanako 2D. *Landslides*, Vol. 10, No. 2, pp. 161-173.
- Johnson, P.A., Hey, R.D., Horst, M.W., and Hess, A.J. (2001). Aggradation at bridges. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 2, pp. 154-157.
- Jun, S.M., Park, J.H., Lee, J.H. and Kwak, K.S. (2006). A hydraulic experiment about the effective of sacrifice piles for interception of debris and reduction of bridge scour. *Proceeding of the KSCE 2006 Conference*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 327-330.
- Kim, S.J., Chung, J.H., Lee, J.S. and Kim, J.T. (2007). Flood damage estimation causing backwater due to the blockage by debris in the bridges. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 7, No. 4, pp. 59-66.
- Ku, H.J., and Jun, K.S. (2008). Varied flow analysis for linear drainage channels. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 8, pp. 773-784.
- Manga, M., and Kirchner, J.W. (2000). Stress partitioning in streams by large woody debris. *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 8, pp. 2373-2379.
- Manners, R.B., Doyle, M.W., and Small, M.J. (2007). Structure and hydraulics of natural woody debris jams. *Water Resources Research*, Vol. 43, No. 6, W06432. doi:10.1029/2006WR004910
- Melvill, B.W., and Dongol, D.M. (1992). Bridge pier scour with debris accumulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 9, pp. 1306-1310.
- Meselhe, E.A., and Hebert, K. (2007). Laboratory measurements of flow through culverts. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 8, pp. 973-976.
- Schmocker, L., and Hager, W.H. (2011). Probability of drift blockage at bridge decks. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 137, No. 4, pp. 470-479.
- Schmocker, L., and Hager, W.H. (2013). Scale modeling of wooden debris accumulation at a debris rack. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 139, No. 8, pp. 827-836.
- Shields, F., and Gippel, C. (1995). Prediction of effects of woody debris removal on flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 4, pp. 341-354.
- Wallerstein, N., Alonso, C., Bennett, S., and Thorne, C. (2002). Surface wave forces acting on submerged logs. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 3, pp. 349-353.
- Wong, T.S.W. (1994). Kinematic wave method for determination of road drainage inlet spacing. *Advances in Water Resources*, Vol. 17, No. 6, pp. 329-336.
- Wong, T.S.W., and Moh, W.H. (1997). Effect of maximum flood width on road drainage inlet spacing. *Water Science and Technology*, Vol. 36, No. 8-9, pp. 241-246.
- Zhu, Z., Chen, Z., Chen, X., and He, P. (2016). Approach for evaluating inundation risks in urban drainage systems. *Science of The Total Environ*, Vol. 553, pp. 1-12.

Received	September 8, 2020
Revised	September 10, 2020
Accepted	September 15, 2020