

연직수문의 퇴적토 배출특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Sediment Transport Characteristics Through Vertical Lift Gate

이지행¹ · 최흥식^{2*}

¹상지대학교 일반대학원 박사과정, ²상지대학교 건설시스템공학과 교수

Ji Haeng Lee¹ and Heung Sik Choi^{2*}

¹Department of Civil Engineering, Sangji University, Wonju 26338, Korea

²Department of Civil Engineering, Sangji University, Wonju 26338, Korea

Received 10 December 2018, revised 24 December 2018, accepted 24 December 2018, published online 31 December 2018

ABSTRACT: In order to analyze sediment transport characteristics of knickpoint migration, sediment transport length, and sediment transport weight through the under-flow type vertical lift gate, the hydraulic model experiment and dimensional analysis were performed. The correlations between Froude number and sediment transport characteristics were schematized. The multiple regression formulae for sediment transport characteristics with non-dimensional parameters were suggested. The determination coefficients of multiple regression equations appeared high as 0.618 for knickpoint migration, 0.632 for sediment transport length, and 0.866 for sediment transport weight. In order to evaluate the applicability of the developed hydraulic characteristic equations, 95% prediction interval analysis was conducted on the measured and the calculated by multiple regression equations, and it was determined that NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency), RMSE (root mean square), and MAPE (mean absolute percentage error) are appropriate, for the accuracy analysis related to the prediction on sediment transport characteristics of kickpoint migration, sediment transport length and weight.

KEYWORDS: Knickpoint migration, Sediment transport characteristics, Sediment transport length, Sediment transport weight, Vertical lift gate

요약: 하단배출 형태의 연직수문을 대상으로 퇴적토 배출특성에 따른 두부침식 거리비, 퇴적토 이동거리와 이동량을 분석하기 위해 수리 모형실험과 차원해석을 수행하였다. Froude 수와 배출특성의 상관관계를 도식화하고, 퇴적토 배출특성을 지배하는 무차원 매개변수에 의한 다중회귀식을 제안하였다. 두부침식거리, 퇴적토 이동거리와 이동량에 대한 각 다중회귀 분석식의 결정계수는 각각 0.618, 0.632, 0.866으로 높게 나타났다. 개발한 퇴적토 배출특성식의 사용성을 평가하기 위해 실제 측정값과 회귀분석식에 의해 계산된 값의 95%의 예측 신뢰구간 분석을 수행하였고, 두부침식거리, 퇴적토 이동거리와 이동량에 대한 예측의 정확도 분석차원의 NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency), RMSE (root mean square)와 MAPE (mean absolute percentage error)는 적절한 것으로 판단되었다.

핵심어: 두부침식거리, 퇴적토 배출특성, 퇴적토 이동거리, 퇴적토 이동량, 연직수문

1. 서론

보는 하천 횡단구조물로 수위를 조절하거나 유량, 각

종 용수 확보 등을 목적으로 설치한다. 그러나 하천에 설치되는 보는 대부분 고정보 또는 가동보는 흐름의 정체를 유발하여 유사를 퇴적시키며, 이로 인해 홍수위

*Corresponding author: hsikchoi@sangji.ac.kr, ORCID 0000-0001-9703-3199

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

상승, 저류량감소 등 많은 문제를 가져온다. 특히 중, 소 하천은 준설장비의 진입 및 경제성 등의 이유로 준설이 원활하게 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존 고정보의 형태가 아닌 퇴적토사의 배출, 저수량을 조절할 수 있는 연직수문이 도입이 요구되며, 연직수문의 개방도 조작에 따른 수리특성뿐만 아니라 퇴적토 배출을 원활히 하기 위한 퇴적토 배출 특성 분석이 필요하다.

수문 주변에서의 퇴적토 이동에 관련된 연구로는 Stein and Julien (1993)은 실험을 통하여 두부침식이 진행되면서 수문 상류부의 퇴적도가 평평해지는 경향과 수직인 면을 유지하는 계단형 두부침식 형태의 식별 기준을 분석하였다. Cantelli et al. (2004)은 댐의 부분적인 제거를 통해 하상의 침식 및 수로의 확장에 대한 실험을 수행하였다. Vasquez et al. (2005)은 두부침식 이동 실험을 통해 얻어진 데이터와 2차원 모델인 River2D를 이용하여 계산된 결과를 비교하였다. Kim (2006)은 보 설치각도에 따른 유량변화를 분석하였고, 보의 상류 쪽으로 떨어진 지점에서의 유속변화를 분석하여 보 상류의 토사 및 오염물질 퇴적현상의 저감효과에 대한 연구를 수행하였다. Kim (2007)은 홍수 시 가동보의 수문을 개방하여 홍수피해를 최소화할 수 있는 방안과 유속의 증가로 보 상류부의 퇴적물질을 저감하는 방안의 적정성에 관한 연구를 수행하였다. Jang (2012)은 2차원 하상변동 수치모형의 모의 결과를 Brush and Wolman (1960)의 실험 결과와 비교하여 검증하고, 단차가 형성된 급경사 구간에서 흐름특성과 두부침식에 의한 천급점 (knick point)의 거동 및 하도의 변화 과정을 분석하였다.

유역에서 저수지에 유입되는 유사를 저감시키기 위한 방법뿐만 아니라, 저수지 퇴사를 저감시키기 위하여 저수지 상류에서 토사 차단, 저수지 상류로의 유입토사의 우회 소통, 저수지를 통한 유입토사의 배출, 저수지 퇴사의 배사, 저수지 퇴적 토사의 기계적으로 제거하는 방법 등이 있다 (Jang et al., 2011). Chang et al. (1996)은 North Fork Feather River의 저수지에서 토사의 배출을 통한 퇴사 조절 효과를 분석하여 유량변화에 따른 저수지 수위저하에 대한 수위-유량곡선과 수문제어에 대한 저수지 운영 절차 및 규칙을 개발하였다. Kim and Park (2012)은 3차원 동수역학 수치모의를 통해 저수지 퇴적토의 배사를 해석하여, 배사효율은 동일한 배사

유량에 대하여 저수지에 퇴적된 유사의 평균입경에는 큰 영향을 받으나, 개방하는 수문의 개수 및 수문 위치에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 분석하였다. Lee et al. (2013)은 낙동강에 건설된 상주보와 구미보를 대상으로 2차원 하상변동 수치모형인 CCHE2D모형을 이용하여 보 상류에 퇴적된 토사의 배출효과를 분석하였으며, 상류에서 2년 빈도의 홍수량이 유입될 때 수문을 완전히 개방할 경우에 배사 효과가 크게 나타나는 것을 확인하였다. Jeong and Lee (2016)은 고무보 저층수 배출관을 대상으로 수리실험을 통하여 유량변화와 저층수 배출관 형상을 달리하여 유사배제 효과를 검토하여, 저층수 배출관을 통한 유사배제량을 정량적으로 예측할 수 있으며, 폐색 등의 문제가 발생하였을 경우 관의 효율성 및 지속성에 대한 문제를 실험을 통하여 규명하였다. Jang and Kim (2017)은 공주보를 대상으로 2차원 수치모형을 이용하여 공주보에서 배사효과를 예측하기 위해 유사 전달을 분석하여, 보에 가까워질수록 유사 전달량이 감소하며 보를 통하여 하루로 유사를 배출 시키는데 한계가 있다는 것을 확인하였다.

기존의 연구는 수문, 댐, 보 등의 설치에 따른 두부침식과 시설물 주변에서의 퇴적과 침식의 양상을 규명하였다. 본 연구에서는 기존 보의 유입유사로 인한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 퇴적토의 이동을 수반한 연직수문의 개방에 따른 퇴적토 배출 특성을 분석하기 위해 수리 모형실험을 수행하였다. 실험에서는 퇴적토를 포설하여 퇴적토의 높이, 유량과 수문 개방도에 따른 퇴적토의 침식과 수문 하류부로 이동하는 퇴적토사의 량과 배출거리에 대해 수리실험을 수행하였다. 퇴적토 배출특성을 지배하는 무차원 매개변수를 도출하기 위해 차원해석을 하였다. 실험을 통해 퇴적토 배출특성과 Froude 수의 관계를 분석하였고, 두부침식거리, 퇴적토 이동거리, 퇴적토 이동량의 관계식을 제시하였다. 회귀식의 사용성을 검토하기 위해 실측값 간의 예측구간의 정확도의 분석과 개발한 식의 적용성의 판단을 위한 통계특성을 분석하였다.

2. 실험장치 및 내용

2.1 실험장치

하단 배출형 연직수문의 퇴적토 배출특성 분석을 위

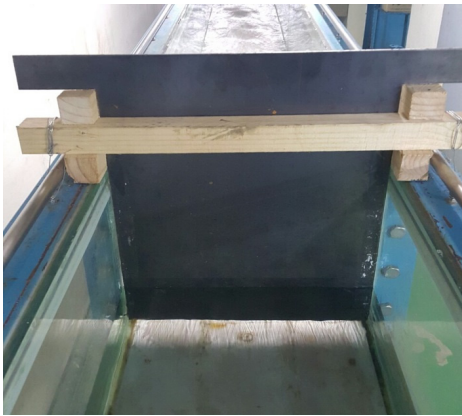


Fig. 1. Photo of sluice gate installed in the channel.

한 실험은 Fig. 1에서와 같이 개도높이 (openness height)의 조절이 가능한 연직수문을 대상으로 실시하였다. 연직수문은 4 mm의 steel 재질로 제작하였으며, 하단부는 예연위어 형식으로 처리하여 위어 월류에 따른 흐름저항을 감소시켰다. 실험장치는 수로와 유량공급부로 저류조, 펌프가 있으며 실험수로는 유량조절조, 모형수로, 하류 집수정으로 구성되었다. 모형수로는 폭 0.4 m, 깊이 0.4 m, 길이 10 m의 직사각형 수로로 유량공급능력은 최대 0.05 m³/s를 흘릴 수 있다 (Fig. 2).

2.2 실험 내용

연직수문을 통과하는 퇴적토 배출 특성을 확인하기 위해 여러 가지 유량조건에 따른 연직 수문상류의 퇴적토 높이와 수문의 개방도 조건에 대해 실험을 수행하였다. 유량은 0.013 m³/s, 0.014 m³/s, 0.016 m³/s, 퇴적토 높이는 0.030 m, 0.040 m, 0.050 m, 수문의 개방도는 0.030 m, 0.040 m, 0.050 m의 각각 3가지 조건에 대해 실험을 수행하였고 퇴적토 입경은 4 mm의 자갈이다 (Table 1).

유량과 퇴적토 높이 변화에 따라 수심측정은 Fig. 3의 측정지점으로 포인트 게이지를 사용하여 수로 중심선에서 측정을 실시하였다. 수심측정을 위해 사용된 포

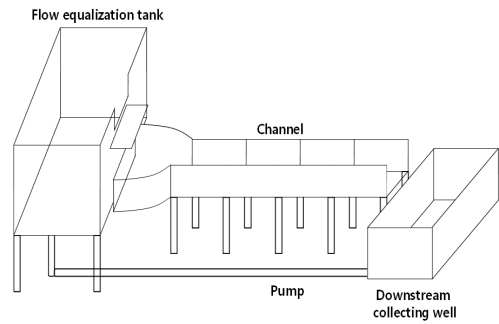


Fig. 2. Configuration of experimental system.

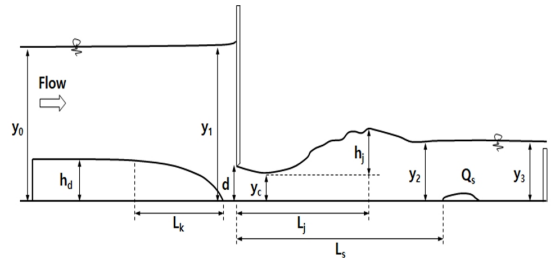


Fig. 3. Sluice gate installation and the corresponding scheme of measuring points.

인트 게이지의 측정범위는 0 - 410 mm로 측정단위는 1.0 mm이다.

안정된 수심을 유지하기 위해 충분한 통수시간 유지 후, 수심이 안정되었다고 판단된 시점에 수심을 측정하였다. Fig. 3의 y₀는 유량이 유입되는 수로 시작점의 수심 (m), y₁은 수문 진전의 상류수심 (m), y_c는 수문 직하류 수축부 수심 (m), y₂는 도수발생 후 안정된 수심 (m), y₃는 하류단 수심 (m), d는 개방도 (m), h_j는 수력도약 높이 (m), L_j는 수력도약 길이 (m), h_d는 퇴적토 높이 (m), d₅₀은 중앙 (median) 입경 (m), L_k는 두부침식거리 (m), L_s는 퇴적토 이동거리 (m), Q_s는 퇴적토 이동량 (kg)이다.

3. 차원해석

수리실험을 통해 퇴적토 이동에 영향을 미치는 주요

Table 1. Experimental conditions

Discharge (m ³ /s)	Gate openness height (m)	Sediment height (m)	Channel slope	Manning's roughness	Channel width (m)	Particle size (m)
0.013	0.030	0.030	0.0013	0.010	0.040	0.004
0.014	0.040	0.040				
0.016	0.050	0.050				

인자들을 도출하였다. 도출된 인자들로 구성된 무차원 변수를 선정하기 위해 Buckingham의 π 정리에 의하여 차원해석을 실시하였다.

퇴적토 이동에 영향을 미치는 주요 인자로 상류수심 (y_1, m), 수축부 수심 (y_c, m), 상하류 수심차 (y_1-y_c, m), 하류단 수심 (y_3, m), 개방도 (d, m), 퇴적토 높이 (h_d, m), 퇴적토 중앙입경 (d_{50}, m), 유량 ($Q, m^3/s$), 유속 ($V, m/s$), 유체의 밀도 ($\rho, kg/m^3$)를 변수로 선정하여 차원 해석의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$f_1(y_1, y_c, y_1 - y_c, y_3, d, h_d, d_{50}, Q, V, \rho, L_k) = 0 \tag{Eq. 1}$$

$$f_2(y_1, y_c, y_1 - y_c, y_3, d, h_d, d_{50}, Q, V, \rho, L_s) = 0 \tag{Eq. 2}$$

$$f_3(y_1, y_c, y_1 - y_c, y_3, d, h_d, d_{50}, Q, V, \rho, Q_s) = 0 \tag{Eq. 3}$$

여기서 f 는 함수기호이며, L_k 는 두부침식거리 (m), L_s 는 퇴적토 이동거리 (m), Q_s 는 퇴적토 이동량 (kg)이다.

Eq. 1 - 3에서 차원해석을 위한 변수로 상류수심 (y_1), 수축부 수심 (y_c), 상하류 수심차 (y_1-y_c), 개방도 (d), 퇴적토 높이 (h_d), 퇴적토 중앙입경 (d_{50}), 유량 (Q)을 선정하고, 질량차원, 길이차원과 시간차원을 각각 포함하는 하류단 수심 (y_3), 유속 (V)과 유체의 밀도 (ρ)를 반복변수로 선정하여, 최종적으로 수리특성을 함수로 나타내면 Eq. 4 - 6과 같다.

Eq. 4는 두부침식거리의 무차원 변수에 대한 식으로 하류단 수심에 대한 수문 직상류 수심비 (y_1/y_3), 수축단 수심비 (y_c/y_3), 수문 상류와 수축부 수심차의 비 ($(y_1-y_c)/y_3$), 개방구간비 (d/y_3), 퇴적토 높이비 (h_d/y_3), 퇴적토 중앙입경과 개방구간의 비 (d_{50}/d), 유량과 수심간의 비 ($Q/(y_3^3/V) > Q/(y_3^2V)$)이고 퇴적토 이동특성을 나타내는 두부침식거리비 (L_k)이다. Eq. 5는 퇴적토 이동거리, Eq. 6은 퇴적토 이동량의 무차원 변수에 대한 식으로 두부침식거리식과 유사하다.

$$\varnothing_1\left(\frac{y_1}{y_3}, \frac{y_c}{y_3}, \frac{y_1 - y_c}{y_3}, \frac{d}{y_3}, \frac{h_d}{y_3}, \frac{d_{50}}{d}, \frac{Q}{y_3^2V}, \frac{L_k}{y_3}\right) = 0 \tag{Eq. 4}$$

$$\varnothing_2\left(\frac{y_1}{y_3}, \frac{y_c}{y_3}, \frac{y_1 - y_c}{y_3}, \frac{d}{y_3}, \frac{h_d}{y_3}, \frac{d_{50}}{d}, \frac{Q}{y_3^2V}, \frac{L_s}{y_3}\right) = 0 \tag{Eq. 5}$$

$$\varnothing_3\left(\frac{y_1}{y_3}, \frac{y_c}{y_3}, \frac{y_1 - y_c}{y_3}, \frac{d}{y_3}, \frac{h_d}{y_3}, \frac{d_{50}}{d}, \frac{Q}{y_3^2V}, \frac{L_s}{y_3}\right) = 0 \tag{Eq. 6}$$

4. 결과 및 분석

4.1 퇴적토 배출특성 분석

Fig. 4는 Froude 수에 따른 두부침식 거리비 (L_k/y_3)이다. 두부침식 거리비는 0.49에서 1.19로 나타났으며, Froude 수가 증가함에 따라 감소하는 양상을 보이고 있다. 일반적으로 Froude 수의 증가에 따라 커진 소류력에 의한 두부침식의 양상은 활발함이 보편적이다. 그러나, 연직수문의 경우 Froude 수는 개방도가 작을수록 증가되나, 개방도가 작아짐은 이동량이 상대적으로 작아지게 되어 연직수문 상류의 소류력이 크지 않음을 나타낸다.

Fig. 5는 Froude 수에 따른 퇴적토 이동거리비 (L_s/y_3)

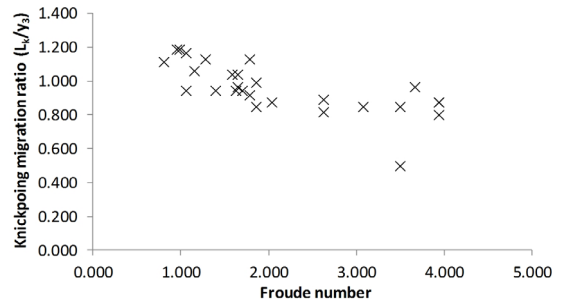


Fig. 4. Variation of knickpoint migration ratio (L_k/y_3) against Froude number.

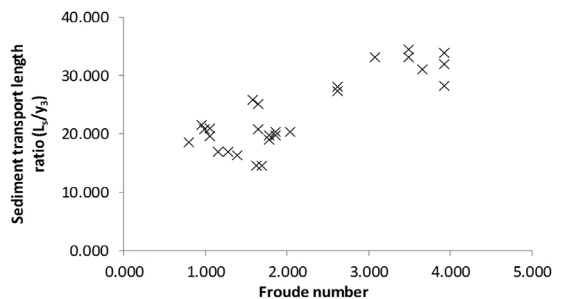


Fig. 5. Variation of sediment transport length ratio (L_s/y_3) against Froude number.

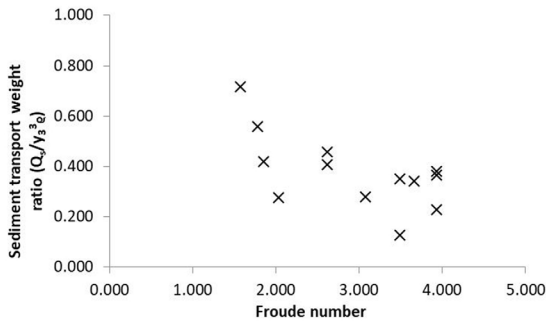


Fig. 6. Variation of sediment transport weight ratio ($Q_s/y_3^3\rho$) against Froude number.

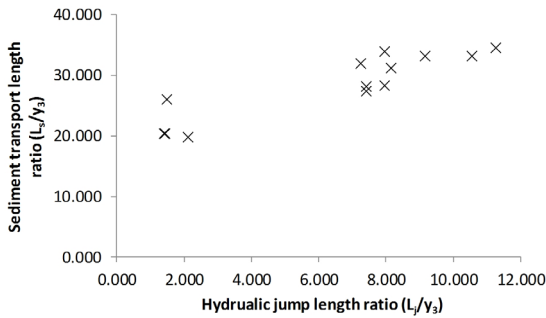


Fig. 7. Relation between sediment transport length ratio (L_s/y_3) and hydraulic jump length ratio (L_j/y_3).

이다. 퇴적토 이동거리비는 14.50에서 34.51로 나타났다. 퇴적토 이동거리비는 Froude 수가 증가함에 따라 함께 증가하는 양상을 보였으나, Froude 수 3.0을 기점으로 감소하는 양상을 보인다. 이는 Fig. 6에서 퇴적토 이동량비가 Froude 수가 3.0까지는 감소하다 3.0을 초과하면 퇴적토 이동량비가 증가하는 현상으로 설명이 가능하다. Froude 수 3.0을 초과하는 경우 퇴적토 이동량비가 증가하여 퇴적토 이동거리비에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 Froude 수에 따른 퇴적토 이동량비 ($Q_s/y_3^3\rho$)이다. 퇴적토 이동량비는 0.13에서 0.89로 나타났으며, Froude 수가 증가함에 따라 감소하는 양상을 보였다. 개방도가 작아짐에 따라서 Froude 수는 증가하고 있으나, 퇴적토 이동량비가 감소하는 것으로 보았을 때 연직수문 상류의 소류력은 감소하는 것으로 판단된다. 이는 개방구간이 큰 Froude 수에서 퇴적토 이동량이 크게 나타나고 Froude 수 3.0까지 감소하다 초과하는 구간에서 강한 흐름으로 퇴적토 이동량이 증가되는 현상으로 나타난다.

Fig. 7은 수력도약 거리비에 따른 퇴적토 이동거리

비의 관계이다. 퇴적토 이동거리비는 수력도약 거리비가 증가함에 따라 증가하는 양상을 보였으며, 이는 퇴적토 이동거리비와 수력도약 거리비가 수축부 유속이 클수록 그 값이 크게 나타나기 때문이다. 또한, 퇴적토 높이가 클수록 두 개의 값이 크게 나타났다.

4.2 다중회귀분석

실험 결과를 통해 산정된 각각의 무차원 변수군에 대하여 회귀분석과 유의성 검정을 통해 퇴적토 배출특성에 영향을 미치는 매개변수와 관계식을 도출하였다. 통계분석을 위해 사용된 프로그램은 IBM SPSS 22v. 로 데이터 관리 및 통계분석을 목적으로 개발된 소프트웨어로 교차분석, 상관분석, 회귀분석, 분산분석 등의 다변량 분석이 가능하다. 무차원 분석을 통해 산정된 Eq. 4 - 6의 독립변수와 종속변수에 대수를 취하여 선형 형태의 관계식으로 변환하여 각각의 배출특성에 대해 회귀분석을 수행하였다.

회귀분석에서 독립변수의 선정은 후진 제거방법을 이용하였다. 후진 제거방법은 모든 독립변수를 포함하는 회귀모형을 만든 후 기여도가 가장 적은 변수부터 차례로 제거시켜 나가는 방법이다. 이에 따라 수리특성을 예측하기 위해 도출된 회귀식은 아래와 같다 (Eq. 8 - 10).

부침식거리 회귀식은 수문 상하류 수심차의 비 ($(y_1 - y_c)/y_3$)와 퇴적토 높이비 (h_d/y_3)의 함수인 Eq. 8과 같다. 그리고 각 독립변수의 계수에 대한 의미를 검토해 보면 수문 상하류 수심차가 클수록 두부침식거리가 줄어들게 되고, 퇴적토 높이비가 클수록 두부침식거리가 증가하는 것으로 나타난다.

$$L_k = y_3 \left\{ e^{0.240 \left(\frac{y_1 - y_c}{y_3} \right) - 0.360 \left(\frac{h_d}{y_3} \right)^{0.243}} \right\} \quad (\text{Eq. 8})$$

퇴적토 이동거리 회귀식은 개방도 높이비의 함수인 Eq. 9와 같다. 독립변수의 의미를 검토해 보면 퇴적토 이동거리는 개방도 높이비가 클수록 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 6에서와 같이 개방도가 클수록 Froude 수는 작게 나타나기 때문에 퇴적토 이동거리가 작게 나타남을 확인할 수 있다.

$$L_s = y_3 \left\{ e^{1.868 \left(\frac{d}{y_3} \right) - 0.992} \right\} \quad (\text{Eq. 9})$$

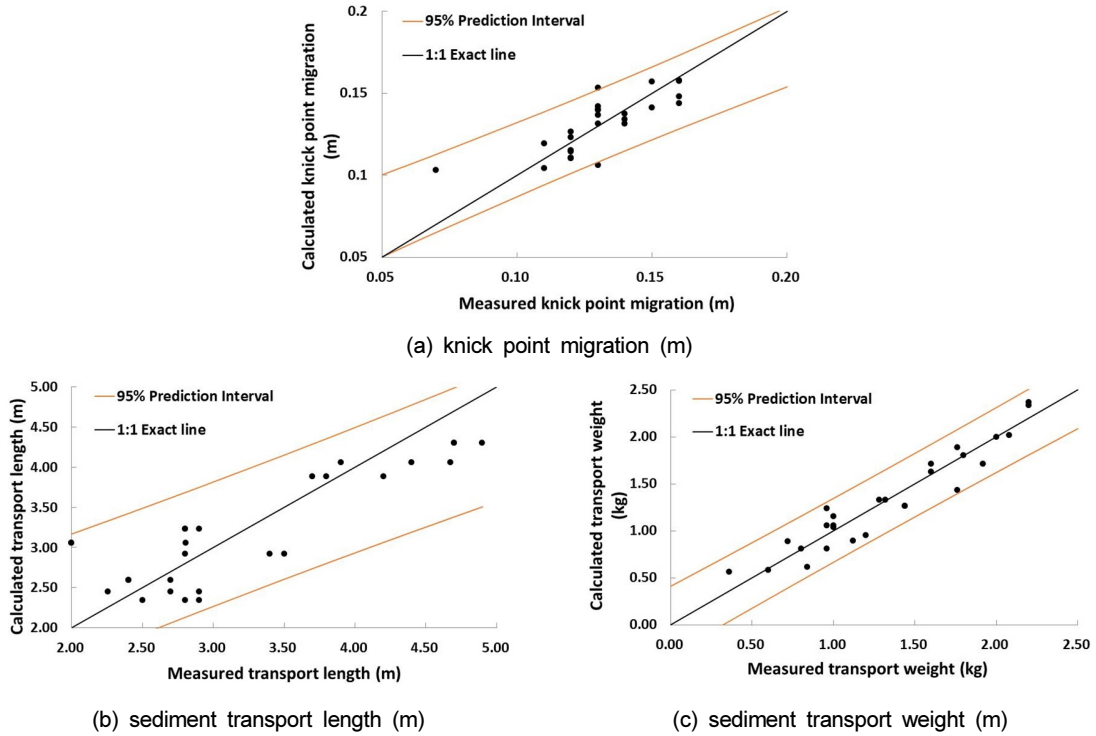


Fig. 8. Analyses of 95% prediction interval for the calculated of sediment transport characteristics.

퇴적토 이동량 회귀식은 수문 상하류 수심차의 비 $((y_1 - y_c) / y_3)$ 와 퇴적토 높이비 (h_d / y_3) 의 함수인 Eq. 10과 같다. 퇴적토 이동량은 수문 상하류 수심차가 클수록 줄어들게 되고, 퇴적토 높이비가 클수록 증가하는 것으로 나타난다. 즉, 퇴적토 이동량은 수문 상하류 수심차가 작고 퇴적토 높이가 클수록 증가하게 되므로 Fig. 5와 Fig. 6으로 설명이 가능하다.

$$Q_s = y_3^3 \rho \left\{ e^{0.825 \left(\frac{y_1 - y_c}{y_3} \right) - 0.922 \left(\frac{h_d}{y_3} \right) 1.278} \right\} \quad (\text{Eq. 10})$$

두부침식거리, 퇴적토 이동거리와 퇴적토 이동량의 회귀식을 도출하였으며, 회귀식 Eq. 8, 9, 10에 대해서 유효성, 유의성 검정 및 다중공선성 분석을 수행하였다.

회귀식의 유효성을 판단하기 위한 결정계수는 Eq. 11에서와 같이 결정계수는 R^2 로 표기하며 1에 가까울수록 우수한 회귀식임을 의미하나, 독립변수의 수가 증가될수록 값이 커지는 경향이 있어, Eq. 12의 수정된 R^2 값을 활용하여 회귀식의 유효성을 판단하였다. 도출된 회귀식의 수정된 R^2 는 두부침식거리 0.586, 퇴적토 이동거리 0.617, 퇴적토 이동량은 0.855로 나타났다.

$$R^2 = \frac{SSR}{TSS} = 1 - \frac{SSE}{TSS} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 1 - \frac{n-1}{n-p-1} (1 - R^2) \quad (\text{Eq. 12})$$

여기서 TSS는 총 제곱합, SSR은 회귀 제곱합, SSE는 오차 제곱합, n은 표본의 개수, p는 설명변수의 개수이다.

제시한 회귀식에 의한 예측값과 실제 측정값을 비교하였다. Fig. 8의 실선구간은 측정값에 따른 95% 예측 신뢰구간이다. 두부침식거리 회귀식에 의한 예측값은 95% 예측 신뢰구간에는 약 92%가 포함되었다. 퇴적토 이동거리와 퇴적토 이동량 회귀식에 의한 예측값은 각각 95% 예측 신뢰구간에 100%가 포함되었다.

회귀분석의 기본 가정 사항 중 잔차의 독립성은 잔차가 다른 잔차에 영향을 미치게 되는 경우를 자기 상관이라고 하는데 자기 상관 높으면 분석의 신뢰성을 잃게 된다. 잔차의 독립성은 Durbin-Watson 값으로 판단하게 되는데 0에 가까울수록 양의 자기상관, 4에 가까울수록 음의 자기상관이 있다고 판단하며, 2에 가까울수

Table 2. Multiple regression analysis results

Equation no.	R^2	Adjusted R^2	Std. Error of the estimate	Durbin-Watson	NSE	RMSE	MAPE
L_k	0.618	0.586	0.11296	1.490	0.735	0.013	9.776
L_s	0.632	0.617	0.16538	2.225	0.854	0.505	16.161
Q_s	0.866	0.855	0.17188	1.411	0.938	0.174	14.609

Table 3. Results in the analysis of variance

Equation no.	Model	Sum of square	df	Mean square	F	Slg.
L_k	Regression	0.495	2	0.247	19.386	0.000
	Residual	0.306	24	0.013		
	Total	0.801	26			
L_s	Regression	1.175	1	1.175	42.955	0.000
	Residual	0.684	25	0.027		
	Total	1.859	26			
Q_s	Regression	4.410	2	2.205	74.639	0.000
	Residual	0.679	23	0.030		
	Total	5.090	25			

록 자기 상관이 없다고 판단한다(Eq. 13). Durbin-Watson 값은 두부침식거리 1.490, 퇴적토 이동거리 2.225, 퇴적토 이동량 1.411으로 나타나 자기 상관이 없는 것으로 판단된다.

모의 값의 적절성을 나타내는 지표로 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)가 있으며, NSE는 관측치와 모델의 관계를 이용하여 모델의 효율성을 평가하는 기법으로 모의 결과가 우수할수록 1에 가까운 값을 나타내며, Eq. 14에 의해서 계산된다 (Nash and Sutcliffe, 1970). NSE값은 두부침식거리 0.735, 퇴적토 이동거리 0.854, 퇴적토 이동량 0.938로 모의 값이 적절함을 확인할 수 있다.

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})}{\sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\text{NSE} = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (\text{Eq. 14})$$

여기서 O는 관측 값, P는 예측 값, \bar{O} 는 관측 값의 평균 값, e_t 는 시간 t에서의 오차이다.

또한 예측모델의 정밀도를 보다 객관적으로 평가하기 위해 실제 측정값과 예측한 값의 차이를 다룰 때 흔히 사용되는 RMSE (root mean square error)와 MAPE (mean absolute percentage error)를 도출하였다. RMSE는 두부침식거리 0.013 m, 퇴적토 이동거리 0.505 m, 퇴적토 이동량 0.174 kg이며 MAPE는 두부침식거리 9.776%, 퇴적토 이동거리 16.161%, 퇴적토 이동량 14.609%로 각각 나타났다 (Table 2).

4.3 회귀모형식의 유의성 검증

퇴적토 배출특성의 다중회귀분석을 통해 도출된 회귀모형의 유의성을 분산분석을 활용하여 검정한 결과, Table 3과 같은 결과를 도출하였다. 자유도 (df, degree of freedom)는 알 수 없는 모집단 모수의 값을 추정하고 이러한 추정치의 변동성을 계산하는데 사용할 수 있는 데이터가 제공하는 정보의 양으로, 표본의 관측치 수와 모형의 모수 수에 따라 결정된다. F값은 독립변수가 종속변수 예측에 도움이 되는지 판단하는 값으로, 도출된 회귀식의 F값은 19.386에서 74.639로 각각 나타났고 이에 대응하는 유의확률 (significance probability)이 모두 0.000으로 유의수준 0.05보다 작으므로 독립변수들 중 적어도 하나 이상의 변수는 종속변수를 설명하는데 유의하게 기여함을 나타낸다.

Table 4. VIF values for determining the multi-collinearity of the independent variable

Equation no.	Model	Unstandardized coefficients		Sig.	Collinearity statistics	
		B	Std. Error		Tolerance	VIF
L_k	Constant	0.240	0.132	0.083		
	$(y_1 - y_c)/y_3$	-0.360	0.061	0.000	0.996	1.004
	h_d/y_3	0.243	0.104	0.027	0.866	1.004
L_s	Constant	1.868	0.194	0.000		
	d/y_3	-0.992	0.151	0.000	1.000	1.000
Q_s	Constant	0.825	0.207	0.001		
	$(y_1 - y_c)/y_3$	-0.922	0.083	0.000	0.994	1.006
	h_d/y_3	1.278	0.161	0.000	0.994	1.006

4.4 독립변수들의 다중공선성 검토

회귀식이 도출된 후에는 회귀모델의 유의성을 검정하기 위해 다중공선성 (multi-co-linearity)을 분산팽창인자 (variance inflation factor, VIF)를 사용하여 확인하였다. 변수들 간의 다중공선성이 존재하는 경우, 다른 독립변수들의 결합으로 영향을 받는 독립변수가 회귀모형 내에서 독자적인 정보를 제공하지 못하게 되므로 R^2 의 값은 큰 반면에 대부분의 회귀계수들이 유의하지 않은 경우가 발생하게 된다. 다중공선성은 독립변수들 사이의 선형종속 (linear dependency)의 관계로 정의되며, 실질적으로 어느 독립변수가 다른 독립변수들로부터 밀접한 상관관계를 가지고 있는 상태를 말한다. 따라서 VIF의 유무를 확인하는 것이 바람직하며, VIF 값이 10 이상이면 다중공선성이 존재한다고 판단하여 독립변수로 사용하지 않는다 (Ham, 2007).

사용된 독립변수의 VIF값은 Eq. 15에 의해 계산되었으며, VIF값은 Table 4에 나타내었다. 두부침식거리, 퇴적토 이동거리와 이동량에 대한 도출된 회귀식의 VIF값은 모두 10 미만으로 다중공선성은 없는 것으로 판단된다.

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2} \quad (\text{Eq. 15})$$

5. 결론

유입유사로 인한 기존 보 상류에서의 퇴적이 발생하는 문제점을 해결하기 위해 연직수문의 수문 개방에 따른 배출특성인 수문 상류에서의 퇴적토의 두부침식과 수문하류로의 배출토의 이동거리와 이동량에 대한 수

리 모형실험을 수행하였다. 차원해석을 실시하여 배출 특성을 지배하는 무차원 매개변수를 도출하고, Froude 수의 변화에 따른 퇴적토 배출특성을 분석하였다. 배출 특성에 영향을 미치는 매개변수와 두부침식거리, 퇴적토 이동거리와 이동량의 관계식을 제시하였다. 아울러 실측값과 회귀식에 의한 예측값에 대한 95% 예측신뢰구간과 통계적 특성의 분석을 통해서 제시한 회귀식의 사용성을 검토하였다. 그에 따른 결론은 다음과 같다.

- 1) 두부침식 거리비는 Froude 수가 증가함에 따라 감소하는 양상을 보였다. 일반적으로 Froude 수가 증가함에 따라 두부침식의 양상이 활발함이 보편적이거나, 연직수문의 경우 개방도가 작을수록 Froude 수는 커지나, 작은 개방구간에 의한 작은 배출량으로 연직수문 상류의 소류력이 크지 않아 퇴적토 이동량이 상대적으로 작게 나타나는 것을 확인하였다.
- 2) 퇴적토 이동거리비는 Froude 수가 증가함에 따라 증가하는 양상을 보였으나, Froude 수 3.0을 기점으로 퇴적토 이동거리비가 감소하는 양상을 보였다. 이는 Froude 수가 3.0을 초과하는 경우 퇴적토 이동량비가 증가하여 하류에 퇴적된 토사가 이동거리비에 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- 3) 퇴적토 이동량비는 Froude 수가 증가함에 따라 감소하는 양상을 보였다. 개방도가 작아짐에 따라 Froude 수는 증가하고 있으나, 퇴적토 이동량비가 감소하는 것으로 보아 연직수문 상류의 소류력은 감소하는 것으로 판단된다. 개방구간이 큰 작은 Froude 수에서 퇴적토 이동량이 크게 나타나고 Froude 수 3.0까지 감소하다 초과하는 구간에서 다소 강한 흐름으로 퇴적토 이동량이 증가되는 현상

으로 나타난다.

- 4) 두부침식거리 회귀식은 수문 상하류 수심차의 비와 퇴적토 높이비의 함수로 나타났으며, 수문 상하류 수심차가 클수록 두부침식거리는 줄어들게 되고, 퇴적토 높이비가 클수록 증가하는 것으로 나타났다. 두부침식거리 회귀식의 결정계수는 0.618, NSE는 0.735, RMSE는 0.013 m, MAPE는 9.776%로 나타났다.
- 5) 퇴적토 이동거리 회귀식은 수문 개방도 높이비의 함수로 나타나며, 퇴적토 이동거리는 개방도 높이비가 클수록 감소하는 것으로 나타났다. 퇴적토 이동거리 회귀식의 결정계수는 0.632, NSE는 0.854, RMSE는 0.505 m, MAPE는 16.161%로 나타났다.
- 6) 퇴적토 이동량 회귀식은 수문 상하류 수심차의 비와 퇴적토 높이비의 함수로 나타나며, 수문 상하류 수심차가 클수록 줄어들게 되고 퇴적토 높이비가 클수록 증가하는 것으로 나타난다. 퇴적토 이동량 회귀식의 결정계수는 0.866, NSE는 0.938, RMSE는 0.174 kg, MAPE는 14.609%로 나타났다.
- 7) 도출된 회귀모형에 따른 예측값과 실제 측정값을 비교한 결과 예측값은 95% 예측구간에 약 92%에서 100%가 포함되어 개발한 회귀식의 사용성을 확인하였다.
- 8) 두부침식거리, 퇴적토 이동거리와 이동량에 대한 제시한 회귀식의 유의성을 검정 결과, 유의확률이 모두 0.000으로 유의수준 0.05보다 작게 나타났고, 사용된 매개변수의 적정성을 검토하기 위하여 다중공선성을 분석한 결과 다중공선성은 없는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업 연구비지원 (NRF-2018R1D1A3B07049297)에 의해 수행되었습니다.

References

Brush, L. and Wolman, M. 1960. Knickpoint behavior in noncohesive material: a laboratory study. *Bulletin of the Geological Society of America*, Vol. 71, pp. 59-71.

- Cantelli, A., Paola, C. and Parker, G. 2004. Experiments on upstream-migrating erosional narrowing and widening of an incisional channel caused by dam removal. *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 3.
- Chang, H.H., Harrison, H.H., Lee, W., and Tu, S. 1996. Numerical modeling for sediment-pass-through reservoirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 122, No. 7, pp. 381-388.
- Ham, H. B. 2007. *Data Analysis and SAS Programming*, Vol. 328. (in Korean)
- Jang, C.L. 2012. 2-Dimensional numerical simulation of the behaviors of knickpoint in the channel with noncohesive materials. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 6, pp. 259-265. (in Korean)
- Jang, C.L. and Kim, G.J. 2017. Numerical simulation of sediment pass-through from Gongju weir. *KSCE 2017 convention*, pp. 105-106. (in Korean)
- Jang, C.L., Im, G.S. and Hwang, M.H. 2011. Technology of flushing sediment for sedimentation reduction in reservoir. *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 44. No. 11, pp. 45-49. (in Korean)
- Jeong, S.I. and Lee, S.O. 2016. Experimental study for flushing of sediment bypass pipe underneath rubber weir. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 31, No. 5, pp. 133-140. (in Korean)
- Kim, D.G. and Park, W.S. 2012. Sediment flushing analysis in a reservoir by using 3 dimensional hydrodynamic simulation. *Journal of Construction and Environment Research Institute*, Vol. 7, No. 7, pp. 12-22. (in Korean)
- Kim, J.G. 2006. The variation of flow characteristics by installing improved movable weir in a river. Master's dissertation, University of Incheon, Incheon, Republic of Korea. (in Korean)
- Kim, J.H. 2007. The study on the bed change simulation depend on moveable weir establishment, Kunsan National University, Kunsan, Republic of Korea. (in Korean)
- Lee, K.S., Jang, C.L., Son, K.I. and Hwang, M.H. 2013. Numerical analysis of the sediment pass-through from the Sangju weir and the Gumi weir by using CCHE2D. *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 29, No. 6, pp. 813-824 (in Korean)
- Stein, O.R. and Julien, P.Y. 1993. Criterion delineating the mode of headcut migration. *Journal of hydraulic engineering*, Vol. 119, No. 1, pp. 37-50.
- Vasquez, J.A., Millar, R.G. and Steffler, P.M. 2005. Two-dimensional morphological simulation in transcritical flow. In *Proceedings of the 4th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, RCEM. pp. 253-258.