

이동한계유속과 한계소류력을 활용한 수제 설치에 관한 연구

김영식·박상호·안익태·추연문**

부산대학교 사회환경시스템공학과

*BK21+ 사업단

A Study on the Installation of Groyne using Critical Movement Velocity and Limiting Tractive Force

Yeong Sik Kim·Shang Ho Park·Ik Tae An·Yeon Moon Choo**

*Brain Korea 21 Plus, Pusan National University, Korea

Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, Korea

(Received : 30 June 2020, Revised : 28 July 2020, Accepted : 28 July 2020)

요약

현재 전 세계적으로 과거와는 달리 기후양상으로 인한 물 부족문제와 함께 홍수로 인한 재해의 위험을 동시에 관리해야 하는 어려움에 직면한 상황이다. 수자원의 관리와 물 산업 육성을 통한 물 강국 실현을 목적으로 4대강 사업이 시행되었으며 유례없는 공사 규모에 비하여 상대적으로 단기간의 공사기간을 두고 진행되었다. 이에 4대강 사업 이후 하천환경이 어떻게 달라지는가에 대한 예측 및 분석이 미흡한 상태이다. 현재 4대강 사업 공사구간 일부에서는 대규모 준설과 홍수 시보로 인한 사류화의 영향으로 인해 침식 및 퇴적이 반복되어 발생하며 지류부의 두부침식이 발생한다. 이러한 문제점 해결을 위해 하상유지공이 설치되었으나 오히려 하천 양안을 침식시키는 결과를 초래하였으며 침식과 과도한 퇴적 등 하상을 안정하게 유지시킬 수 있는 새로운 접근방법 및 기법의 개발이 요구된다. 수제는 하천에서 흐름을 하도 중앙으로 집중시켜 주운을 위한 일정수심을 확보하는 역할을 하며 흐름방향과 유속을 제어함으로써 흐름에 의한 제방 침식작용을 방지하는 호안 역할을 한다. 또한, 수제는 하안 및 제방의 보호 기능 외에 국부적인 침식과 퇴적을 유도함으로써 자연스러운 형태의 하안을 형성하여 다양한 생태환경을 제공한다. 따라서 본 연구에서는 이동한계유속과 한계소류력을 활용하여 현재 사용되고 있는 수제형상결정 방법을 검토한 후 실제 국내하천에 적용 가능한 수리학적 인자를 고려한 새로운 한계유속 (\bar{U}_d) 및 새로운 저항계수 식을 개발하여 수제 설치 시 적용 가능한 방안을 제시하였다.

핵심어 : 사행수로, 수제, 이동한계유속, 하상안정화, 한계소류력

Abstract

Unlike in the past, the world is facing water shortages due to climate change and difficulties in simultaneously managing the risks of flooding. The Four Major Rivers project was carried out with the aim of realizing a powerful nation of water by managing water resources and fostering the water industry, and the construction period was relatively short compared to the unprecedented scale. Therefore, the prediction and analysis of how the river environment changes after the Four Major Rivers Project is insufficient. Currently, part of the construction section of the Four Major Rivers Project is caused by repeated erosion and sedimentation due to the effects of sandification caused by large dredging and flood-time reservoirs, and the head erosion of the tributaries occurs. In order to solve these problems, the riverbed maintenance work was installed, but it resulted in erosion of both sides of the river and the development of new approaches and techniques to keep the river bed stable, such as erosion and excessive sedimentation, is required. The water agent plays a role of securing a certain depth of water for the main stream by concentrating the flow so much in the center and preventing levee erosion by controlling the flow direction and flow velocity. In addition, Groyne products provide various ecological environments by forming a natural form of riverbeds by inducing local erosion and deposition in addition

* To whom correspondence should be addressed.

Brain Korea 21 Plus, Pusan National University, Korea
E-mail: chooyean@naver.com

- Yeong Sik Kim Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, Korea / The doctor's course (skrcf0688@hanmail.net)
- Shang Ho Park Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, Korea / The doctor's course (sangogo@nate.com)
- Ik Tae An Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, Korea / The doctor's course (ike-an@hanmail.net)
- Yeon Moon Choo Brain Korea 21 Plus, Pusan National University, Korea / Contract Professor (chooyean@naver.com)

to the protection functions of the river bank and embankment. Therefore, after reviewing the method of determining the shape of the Groyne structure currently in use by utilizing the mobile limit flow rate and marginal reflux force, a new Critical Movement Velocity (\bar{U}_d) and a new resistance coefficient formula considering the mathematical factors applicable to the actual domestic stream were developed and the measures applicable to Groyne installation were proposed.

Key words : Bed Stabilization, Critical Movement Velocity, Groyne, Limiting Tractive Force, Meandering Channel

1. 서 론

하천 내에 설치되는 수제는 하천에서 흐름을 하도 중앙으로 집중시켜 일정 수심을 확보하는 역할을 한다. 또한 유속과 흐름방향을 제어함으로써 흐름에 대한 제방 침식작용을 방지하는 호안 역할을 하며 이 외에도 호안의 파손방지, 생태계 보전, 경관개선 및 유량확보 등의 많은 목적을 가지고 있는 구조물이다. 수제를 설계 시 고려해야 할 점은 우선 수로 내의 유속을 안전하게 저감 시키고 하상 세굴을 방지하도록 설계 한다. 그리고 설치 후에 파제 되거나 하상 재료가 이동하지 않게 안정하게 설계 한다.

외국의 경우는 여러 실험들과 방안들을 모색하여 대안 등을 오랫동안 축적한 경험을 바탕으로 실제 하천에 적용하고 있지만 국내의 경우는 수제에 대한 설치기준이나 설계기준이 없어 실제 현장적용에 많은 어려움이 있다. 특히, 기존에 제시된 경험적 수제 간격공식 등을 모형에 적용하는 수준에 머물고 있다.

따라서 본 연구에서는 월류형 불투과수제 설치 시 그 기준이 되는 저수수제의 설계에 제시된 저항공식을 위주로 현재 사용되고 있는 수제형상결정 방법을 검토한 후 실제 우리나라 하천에 적용 가능한 수리학적 인자를 고려한 이론적 공식이나 반 경험공식을 개발하여 수제 설치 시 적용 가능한 방안을 제시하고자 한다.

1972년에 일본의 건설성 토목연구소 하천수리시험소에서 수리모형실험을 통한 하도 계획에 관한 하도 특성의 차이, 어떤 수리학적 현상이 일어나는 위치의 차이를 명확하게 인식한 후에 하천의 전 구간에 걸친 각종의 계획을 세우지 않으면 안 되며, 하천계획은 단기간에 발생하는 현상과 장기간에 걸쳐서 발생하는 현상으로 구분하여 수립하지 않으며, 결과적으로 하천에서 이상현상이 발생하게 된다고 지적하고 있다. 수제의 길이와 설치 각도의 변화 등에 따른 수제 주변의 흐름과 하상 및 지형 변화에 대한 연구로는 Elawady et al. (2001)이 실험을 통해서 흐름의 방향에 대하여 기울어진 수제의 흐름 및 세굴특성을 분석하였다. 그리고 Teraguchi et al. (2008)은 투과성 수제와 불투과성 수제 주변에서 난류의 거동과 하상변동 특성을 실내실험과 3차원 수치모의를 수행하여 분석하였다.

국내에서는 Nam (1978)이 한국에서 최초로 Brown 공식을 이용하여 팔당댐-행주대교 구간에 대하여 하상변동 해석을 실시한 바 있었으며, 그 후 Park (1984)이 한강 하류부에 St.Venants 공식을 적용하여 홍수 시 발생하는 하상변동을 모의하였다. 그러나 이는 장갑하나 하상토의 입경변화는 전혀 고

려하지 못한 한계점을 가지고 있다. 1990년대에 접어들면서 하상변동에 관한 연구가 활발히 진행되었는데, 한국건설기술연구원(1991)에서는 하상변동 예측모델의 비교분석 연구를 통하여 예측모델의 체계적인 정리 및 비교를 수행하였다. 그리고 최근에는 Lee et al. (2016)가 2차원 수치모형을 이용하여 수제군이 설치되었을 때, 수제의 설치 간격과 길이 변화에 따라 흐름 특성과 하도의 변화 과정을 분석하였다.

2. 이론고찰

일본 건설성에서는 목표 유속개념을 사용하는데, 이는 수제 설치 후의 실제 하천에서 발생 가능한 유속으로 인하여 하상 재료가 이동되지 않는 정도의 유속 말한다. 또한 수제의 형상이 수리학적 측면에서 안정적이고 지속적으로 그 기능을 유지할 수 있도록 설계한다.

2.1. 이동한계유속 산정

2.1.1 한계소류력(τ_{*c})

운반에 평균적으로 작용하는 전단응력(τ_0)은 하상경사가 i 인 개수로와 물이 등류상태로 흐를 때의 경심을 R 이라 하면 다음과 같다.

$$\tau_0 = \rho g R i = w R i \tag{1}$$

각종실험 등을 통하여 주어진 하상 입자에 대한 소류력이 어떤 한계 값을 넘으면 사립의 이동이 시작된다. 이 한계 값을 통상 한계소류력 (τ_{*c})라 한다.

부등류에서는 하상경사(i)대신 에너지경사(I_e)를 사용하면, 식(1)은 근사적으로 식(2)와 같다.

$$\tau_0 = \rho g R I_e = w R I_e \tag{2}$$

$$I_e = - \frac{d}{dx} \left(\frac{v^2}{2g} + H \right) \tag{3}$$

여기서, I_e 는 식(3)과 같으며, H 는 기준면으로부터 측정된 높이로서 수위($H = h + z$)이다. 폭이 넓은 구형 수로인 경우는 $R \approx h$ 이므로 식(4)와 같다.

$$\tau_0 = \rho g h I_e = w h I_e \tag{4}$$

일반적으로 소류력을 마찰속도 (u_*)를 대입하여 나타내면 식(5)와 같다.

$$\tau_0 = wRI_c = \rho g RI_c = \rho u_*^2 \tag{5}$$

2.1.2 이동한계유속(\bar{U}_d) 산정

(1) 한계소류력(τ_{*c}) 결정

일본에서는 손쉽게 수리학적 인자를 구할 수 있고 실용적 측면에서 신뢰도도 높은 한계소류력 식으로 간략화한 식(6)인 안탄 식을 일반적으로 사용한다.

$$d_m \geq 0.303cm : u_*^2 c = \Upsilon_c / \rho = 80.9d_m \text{ (단위:cm-sec)} \tag{6}$$

(2) 이동한계유속(\bar{U}_d) 산정

우선 식(5)로부터 에너지경사(I_e) 식인 식(7)을 산정한다.

$$I_e = u_*^2 / gR \tag{7}$$

한계소류력 식(6)을 식(7)에 대입정리하면 식(8)과 같다.

$$I_e = \frac{0.809 \cdot d_m}{gR} \tag{8}$$

또한, 하천에서 가장 많이 쓰이는 매닝의 평균유속공식에 한계 소류력과 평균입경과의 관계식(8)을 대입 정리하면 하상 재료의 이동한계를 나타내는 이동한계유속(\bar{U}_d)이 된다.

$$\bar{U}_d = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n \sqrt{g}} \sqrt{0.809 \cdot d_m} \tag{9}$$

2.2 수제의 저항계수(f)와 한계저항계수(\bar{f}) 산정

2.2.1 한계저항계수(\bar{f}) 산정

저수 수제설계의 수제저항법칙에 따르면 월류형 불투과 수제에 의한 한계저항계수 식은 식(10)과 같다.

$$\bar{f} = 2 \left[\frac{u_{*c}}{\bar{U}_d} \right]^2 \quad (\because u_{*c} = \sqrt{gRI_c}) \tag{10}$$

여기서 u_{*c} 는 한계마찰속도, \bar{U}_d 는 이동한계속도이다.

2.2.2 저항계수(f) 산정

실제 하천이 가지고 있는 저항의 정도를 나타내는 저항계수는 하천 내의 수많은 수리학적 인자와 관련되어있기 때문에 정확히 표현하기는 어려운 실정이다. 그러나 일본 건설성에서 많은 실험자료 등을 적용한 결과, 수제의 높이, 간격, 길이와 하천 폭의 비, 수심 및 평균유속 등이 고려된 저항계수 식(11)이 실제 하천에서의 저항특성을 잘 나타내는 것으로 알려져, 저수 수제설계의 기준으로 현재 사용되고 있다.

$$f = \frac{k \cdot h_g}{\sqrt{c \cdot H}} \left[\frac{\bar{U}}{\sqrt{g \cdot h_g}} \right]^{-1.47} \cdot m^{0.62} \tag{11}$$

여기서, k 는 0.11~0.12(통상 0.11), h_g 는 수제높이(m), c 는 수제간격(m), \bar{U} 는 수제 상류의 하천평균유속, m 은 수제길이와 하천 폭의 비, H 는 수심(m)이다.

2.3 수제의 형상결정

수제의 형상결정 방법은 월류형 불투과 수제에 의한 하천의 이동한계유속이 \bar{U}_d 인 경우, 식(11)로 구한 저항계수(f) 값이 한계저항계수(\bar{f}) 값보다 크게 되도록 수제의 형상을 결정하면 된다.

$$f \geq \bar{f} \tag{12}$$

따라서 실제 하천에서 수제의 크기, 간격 및 높이 등을 계획할 때, 식(12)와 같은 관계를 만족하도록 설계하면, 수리학적 측면에서 하천 유속을 저감 하면서 기초부의 세굴도 방지 가능한 안정성 있는 수제 규모를 결정할 수가 있다.

3. 수제 설치의 새로운 기준

일본의 수제설치기준은 다양한 수리실험이나 여러 방안들을 모색하고 대안 등을 오랫동안 축적하여 그 결과를 실제 현장에 적용 가능하도록 반 경험공식들을 유도하여 주요 설계인자인 수리 인자들과 연결하여 수제의 간격이나 크기 등을 결정하였다.

그러나 일본 건설성의 공식은 대부분 일본하천 특성을 반영한 반 경험공식이기 때문에 우리 하천에 바로 적용하려면 우리 하천이 가지고 있는 고유의 입경 특성이나 하천의 수리학적인자 등이 반영된 우리만의 반 경험공식이 필요할 것이다.

따라서 본 절에서는 우리 하천의 하상특성이 반영된 이동한계유속(\bar{U}_d)공식과 수제의 저항계수 식(f)를 우리 하천에서 손쉽게 취득할 수 있는 수리학적 인자들을 적용하여 새롭게 산정하여 이를 통하여 우리나라에 적용 가능한 수제형상결정 방법을 제시하고자 한다. 특히 대표적인 충적하천 구간인 낙동강 구간의 자료를 주로 사용하였다.

3.1 하상 재료의 이동한계유속 산정

3.1.1 하상 재료의 이동한계유속(\bar{U}_d) 산정

(1) 하상 재료의 평균 입경(d_m) 결정

실제 하천의 하상은 조도범위가 매우 넓은 혼합 사력으로 구성되어 있다. 혼합 사력 하상에서 각 입자 간의 이동한계는 세립이 조립질로 구성되기 때문에 흐름으로부터 차폐되어 움직이기 어려운 반면, 조립질은 평균 사면에서 돌출되어 움직이기 쉬운 등 그 거동이 매우 복잡하다. 따라서 본 논문에서는 이들 지표의 혼합효과에 대한 물리적 의미가 매우 복잡하고 불명확하므로 하상 재료의 평균 입경(d_m)을 혼합 입경을 대표 입경으로 선택하였다. 한편, 본 논문의 결과를 적용 가능한 하천은 낙동강이므로 낙동강 하천기본계획(변경) 상에 있는 평균 입경에

근접한 대표 입경을 평균입경 범위로 선택하였다. 따라서 낙동강 상류는 0.52~19.5mm 범위로 하고 하류는 0.16~11.96mm 범위를 대략적인 평균입경 범위로 사용하였다.

(2) 한계소류력(τ_{*c}) 결정

Shields(1936)는 한계소류력 개념을 이용하여 사립자의 한계 조건 관계를 제시하였으며, 한계조건에 대한 그의 해석은 관련된 변수의 차원 해석으로 시작하였지만, 간단하며 분명한 물리 법칙에 의해서도 추론할 수 있는 장점이 있다. 통상 shields 곡선이라고 불리우며 한계조건을 나타내는 Shields diagram은 현재까지도 많이 쓰이고 있다. 그러나 Shields 조건에는 사립자 입경과 마찰속도가 양쪽에 모두 있기 때문에 시행 착오법으로 원하는 변수를 구해야 하는 단점이 있다.

따라서 실용적인 측면에서 손쉽게 원하는 값을 구할 수 있고 신뢰도가 높은 한계 소류력 식으로는 표원 식과 안탄 식 등이 있다.

본 논문의 결과를 적용 가능한 하천은 낙동강이므로 낙동강 상류의 0.52~19.5mm와 하류의 0.16~11.96mm 범위상의 평균입경 범위와 근접한 구간의 관계식인 표원 식을 한계 소류력 식으로 채택하였다.

지름 d의 단위로서 cm, 사립의 비중을 $\frac{\sigma}{\rho} = 2.64$, $\beta = 1$,

$g = 980\text{cm}/\text{sec}^2$, $\nu = 0.01\text{cm}^2/\text{sec}$ (20.3°C)를 사용해서 간략화한 식(13)과 같다(cm-sec단위).

$$0.085 < d_m < 0.213\text{cm} : \therefore u_{*c}^2 = \frac{\tau_{*c}}{\rho} = (16.2\log 1.18d_m + 55.0) \cdot d_m \quad (13)$$

(3) 이동한계유속(\bar{U}_d) 산정

하상 재료의 평균 입경과 한계소류력의 관계와 하천의 평균 유속을 연결하여 수제의 형상 결정에 사용할 하상 재료의 이동한계유속(\bar{U}_d)을 산정한다.

한계 소류력 식(13)을 식(7)에 대입하여 정리하면 식(14)가 된다.

$$I_c = \frac{16.2\log 1.18d_m + 55.0}{gR} \cdot d_m \quad (14)$$

평균유속 산정 시 가장 많이 쓰이는 매닝의 평균유속 식에 한계소류력과 평균 입경과의 관계 식(14)를 대입하여, 하상 재료의 이동한계유속(\bar{U}_d) 식(15)를 산정한다.

$$\bar{U}_d = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n\sqrt{g}} \sqrt{(16.2\log 1.18d_m + 55) \cdot d_m} \quad (15)$$

3.2 수제의 저항계수(f)와 한계저항계수(\bar{f}) 산정

3.2.1 한계저항계수(\bar{f}) 산정

수제저항법칙에 따르면 수제에 의한 한계저항계수 식은 식

(10)과 같다. 여기서 한계저항계수는 실질적으로 이동한계유속과 마찰속도와의 비를 나타내고 있다. 이 값은 결국 어떤 하천에 설치될 수제의 형상 결정에 하한 기준이 되는 값이 된다. 따라서 두 값을 비교하여 수제의 설계 값을 결정하지만 각각의 값이 수치적으로 산정된 후에야 설계의 적격 여부를 판단할 수 없는 한계가 있다. 더욱이 식(10)과 식(11)을 서로 비교 분석 한다면 서로 같은 수리학적 인자를 포함하고 있어야 하지만 그렇지 못하다. 따라서 본 논문에서는 기존의 식(10)이나 식(11) 중 하나의 식을 변경하여 같은 수리 인자를 포함하도록 식(10)이나 식(11)을 새롭게 산정하였다. 아울러 측정된 데이터나 수치모델 결과 등을 사용하여 새롭게 산정된 식의 타당성을 검증하였다. 여기서는 저항계수(f) 식(11)을 새롭게 산정한 후 그 결과를 기존의 한계저항 식인 식(10)식과 비교분석 하였다. 비교분석을 통하여 새롭게 수제의 형상을 결정하는 방법을 제안하였다. 우선 저항계수(f) 식(11)을 새롭게 산정하였다.

3.2.2 새로운 저항계수(f) 산정

한계저항계수 식인 식(10)이 가지고 있는 수리학적 인자를 저항계수 식인 식(11)에 포함시키기 위하여 식(10)과 평균유속 식을 대입 정리하면 식(16)과 같다.

$$\left[\frac{u_{*d}}{\bar{U}_d}\right]^2 = \frac{n^2 g R}{R^{\frac{4}{3}}} = \frac{n^2 g}{R^{\frac{1}{3}}} \quad (16)$$

식(16)을 식(11)에 대입 정리하면 식(17)과 같이 새로운 저항공식이 유도된다.

$$f = \frac{k \cdot h_g}{\sqrt{c \cdot [n^2 g (\frac{\bar{U}}{u_{*d}})^2]^3}} \left[\frac{\bar{U}}{\sqrt{g \cdot h_g}}\right]^{-1.47} \cdot m^{0.62} \quad (17)$$

4. 설계 가이드라인 제시

가상 수로를 낙동강 유역과 비슷하게 적용한 결과를 사용하였다. 입경은 낙동강 실제 입경을 그대로 적용하였으며, 폭은 200m로 광폭하천을 기준으로 설정하였다. 본 논문에서 제시하는 수제설계 가이드라인은 월류형 수제를 중점적으로 수행하였다. 비월류형 수제를 다루지 않은 사유는 우리나라의 강우 특성상 하천의 수위가 계절에 따라 크게 변화하므로 하천에 월류형 수제가 설치되더라도 갈수기가 되면 비월류형 수제로 되어 그 기능을 수행할 수 있기 때문이다.

Fig.1(a)의 경우에 기 수행한 가상모의 수로에 월류형 수제를 적용한 데이터를 사용하여 수제길이와 하천 폭의 비를 0.25로 두고 수제의 간격을 100~350m로 변경하며 적용한 결과를 Fig.1(a)와 같이 나타내었다. 수제와 하천 폭의 길이를 일정하게 두었을 때 평균유속과 마찰속도의 비에 따라 폭을 변화시켜나가면 한계저항계수 \bar{f} 보다 큰 저항계수 f 를 가지는

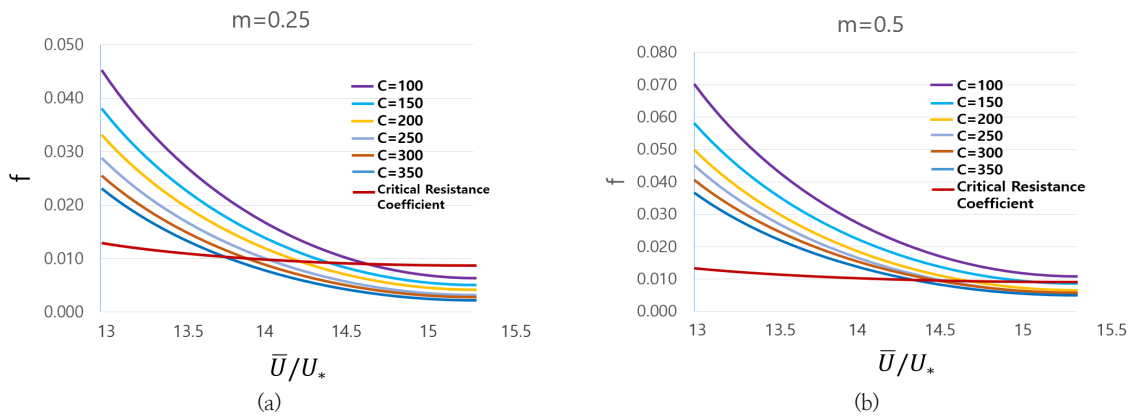


Fig. 1. $f-u/u_*$ - m graph for dikes design. (a) in $m=0.25$, $d=0.52\sim 19.5\text{mm}$, (b) in $m=0.5$ $d=0.16\sim 11.96\text{mm}$.

수제 간격의 범위를 한눈에 알 수 있다. 따라서 그래프 상에서 한계저항계수 값을 의미하는 빨간색 선의 아래에 위치한 수제 간격은 하상의 변동될 수 있으므로 설계 시 지양할 필요가 있다. 한계저항계수 값 라인의 위는 수리학적으로는 안정하다. 따라서 그래프를 통해 적정 수제 간격을 결정할 수 있으므로 경제적인 효과도 고려해서 설계할 수 있는 편리함이 있다.

Fig.1(b)는 하천폭과 수제길이의 비를 0.5로 변화시켜 적용시켰다. 수제길이의 비가 0.25일 경우와 비교하여 수제의 저항계수 값이 증가한 것을 알 수 있다. 즉 물리적으로 하천의 수제의 크기와 압력의 크기는 정비례하는 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 실제 하천의 적용 예이다. 낙동강 수제의 국가하천 감천이 대상이며, 경북 김천과 경북 구미에 흐른다. 수제 형상결정을 위한 제원은 해당 하천 HEC-RAS자료를 이용해 1차원 홍수위 분석 자료를 사용하였다. 지점별 하상재료 채취시료 실험 결과 값이 평균입경이며 평균입경은 d_{50} 이다($d=0.52\text{mm}$). 수제 간격이 50m인 경우에서 유량을 $600\sim 1,500\text{m}^3/\text{s}$ 까지 변화시켜 가며 적용하였다. 상기와 같이 유량을 변위로 설정한 이유는 실제 하천의 강우빈도별 홍수량을 유추하기 위함이다. 즉 600은 50년 빈도로, $900\text{m}^3/\text{s}$ 는 100년 빈도로 적용할 수 있다.

수제의 설치간격이 결정되어 있을 경우에 빈도별 유량에 따라 한계저항계수를 만족하는 수제의 저항계수 f 의 상한값을 쉽게 결정할 수 있다. Fig. 2에서는 빈도별 유량이 $600, 900\text{m}^3/\text{s}$ 일 때 간격 50m가 안정함을 알 수 있고 그보다 더 큰

홍수인 $1,200\text{m}^3/\text{s}$ 이나 $1,500\text{m}^3/\text{s}$ 일 경우에는 간격을 50m로 설정하게 되면 수제의 붕괴를 의미한다. 따라서 수제의 간격에 따라 설계자가 편리하고 간편하게 안정성을 평가할 수 있다는 장점을 가진다.

Fig. 3은 설계홍수량, 하천 폭, 수제길이를 고정하였을 경우를 나타내었다. 즉 이 그래프는 수제의 간격에 따른 수제저항계수 값의 변화를 의미한다. 실제 하천에 수제 설계 시 하천의 계획 홍수량은 이미 결정되어 있고 수제의 길이는 대략 10% 내외로 설계를 하므로 설계 시 결정해야 하는 중요한 변수는 수제의 간격이다. 따라서 수제의 간격에 따른 수제 저항계수의 안정성을 평가할 수 있는 중요한 지표로 활용할 수 있음을 잘 보여준다. 상기 그래프를 통한 분석 결과 수제의 간격이 약 70m 이하는 수제 저항계수의 값이 한계저항계수 값보다 크므로 수제가 안정하다는 것을 알 수 있고 70m를 넘어서게 되면 수제 하상이 불안정하다는 것을 쉽게 알 수 있다.

덧붙여 위의 그래프들을 살펴보면 수제의 간격이 증가할수록 저항계수 값들은 낮아지는 것들을 확인할 수 있다. 이는 수제의 간격이 과도하게 길어진다면 수제의 저항계수 값이 한계저항계수보다 낮아지므로 이러한 저항계수의 감소는 수제의 안정성에 문제를 일으킬 수 있으며 유속의 증가에 따라 수제가 파손될 가능성이 높아짐을 의미한다.

결론적으로 식(10)과 같은 관계를 그래프로 변환하여 안정성 범위 내에서 형성되도록 수제의 크기, 간격 및 높이 등을

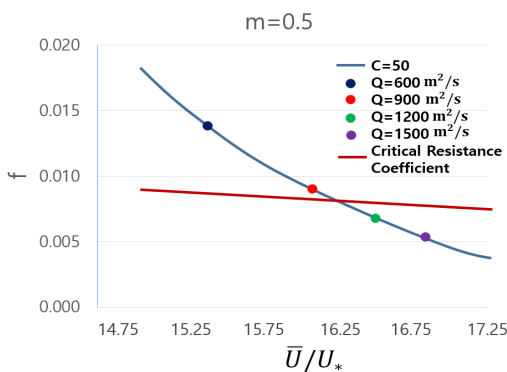


Fig. 2. Graph for dikes design stability in $m=0.5, c=50\text{m}$.

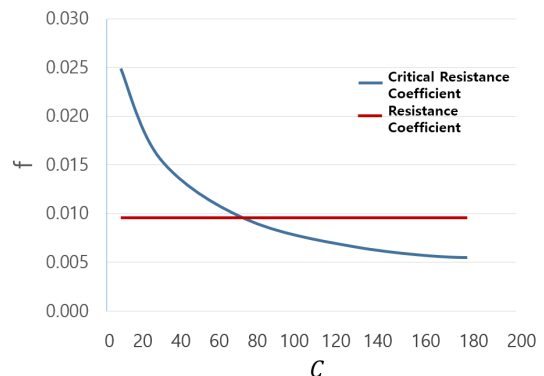


Fig. 3. Guide line of dike design with dikes distance.

설계하면, 수리학적 안정성 측면에서 하천 유속을 저감 하면서 기초부의 세굴도 방지 가능할 것이다. 따라서 이러한 한계저항계수와 저항계수의 관계를 산정하여 Fig.1~Fig.3과 같이 그래프로 변환하여 사용한다면, 수제의 안정성을 담보할 수 있는 수제의 길이와 하천 폭, 수제의 높이 및 수제의 간격을 안전하게 설계할 수 있다.

또한, 현재 우리나라에서 하천실시설계 시 수제의 간격을 결정하는 것은 많은 노력과 시간이 소요되며 매우 어렵게 적용되고 있는 실정이다. 실제로 수제의 간격을 결정하는 기준이 없는 현재 시스템 상에서 과소 혹은 과다 산정 시 발생하는 문제는 고스란히 공사비의 증가로 이어지게 되고 사고 발생률을 증가시키게 된다. 그러므로 본 논문에서 제안하는 방법을 활용하여 다양한 실제 하천조건 및 실내 수리모형실험을 통해 지속적인 보완 및 검증을 한다면 한국형 하천에 적용 가능한 수제설계 가이드라인이 될 것으로 판단된다.

5. 결론 및 고찰

충적하천에서 발달하는 사행현상은 만곡하도일 경우 수중부와 사주부가 교호적으로 나타나며, 직선하도 일 경우도 하폭이 넓은 때는 하도 내에서 망상 흐름이 발생하고 사행흐름이 발달하게 됨을 알 수 있었다. 특히, 만곡하도의 경우 제방을 보호하고 고수부와 저수로 호안을 안정화시키기 위해서는 수로의 흐름중심(유심)을 하천의 중앙부로 유도해야 하지만, 하천이 퇴적층으로 이루어진 충적하천에서는 하상의 안정화와 저수로의 안정화가 쉽지 않은 것이 하천관리의 특수성이다. 그러므로 지금까지 실무에서는 하천관리의 경우에 하천 횡단면을 주로 복단면 또는 복복단면으로 계획하고 있으나 복단면의 호안 공은 고비용이 수반되고 있어 경제성과 친환경성(친생태성)으로 인정받고 있는 수제공법이 국내에서도 널리 도입되고 있다.

본 연구에서는 일반적으로 수행되었던 직선 및 만곡하도에 수제 설치에 따른 수제 주변의 수리 현상과 저수호안 및 하상의 거동을 분석하여 비교하고 이를 고찰한 내용을 요약하였고 이를 바탕으로 기존의 경험 식을 이용하여 한국형 수제설계를 위한 가이드라인을 제시하였다.

한계저항계수 식을 활용하여 유량의 변화에 따른 수제 하상의 안정화 및 간격을 결정할 수 있는 가이드라인을 제시하였다. 본 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 실제 하천의 하상은 조도 범위가 매우 복잡하고 혼합사력으로 구성되어 있다. 따라서 하천의 대표 입경을 사용하여 한계소류력을 결정하였고 매닝 식과 연결하여 새로운 하상 재료의 이동한계를 나타내는 한계유속(\bar{U}_d)을 산정하였다.

2) 월류형 불투과수제에 대하여 한계저항계수 식과 수제의 저항계수 식의 관계를 변형하여 두 식의 연관성을 위해 같은 수리학적 인자를 포함하도록 하는 새로운 저항계수 식을 개발하였다.

3) 개발된 공식을 통하여 여러 가지 경우를 그래프로 변환하였고 실제 하천에서 일어날 수 있는 물리적 의미를 가지는 수

제설계를 위한 가이드라인을 제시하였다. 본 가이드라인은 현재 적절한 기준이 없는 우리나라의 상황에서 매우 좋은 대안이 될 것으로 판단되며 향후 지속적인 연구 및 분석을 통해 실내 및 자연하천에서의 각종 수리모형실험을 통한 검증을 거친다면 실제 설계 시 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Elawady, E, Michiue, M, and Hinokidani, O(2001). Movable bed scour around submerged spur-dikes, *J. of hydraulic Engineering*, 45, pp. 373-378. [DOI:<https://doi.org/10.2208/prohe.45.373>]
- Kang, JG, Yeo, HK, Roh, YS(2006). An experimental study on a characteristics of flow around groynes for groyne spacing, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, 26(3B), pp. 271-278. [Korean Literature]
- Lee, KS, and Jang, CL(2016). Numerical investigation of space effects of serial spur dikes on flow and bed changes by using Nays2D, *J. of Korea Water Resource Association*, 49(3), pp. 241-252. [Korean Literature] [DOI:<https://doi.org/10.3741/jkwra.2016.49.3.241>]
- Lee, YG, Ko, JY, Lee, JW, Jung, SW(2009). Development of sediment discharge computation system for characteristic analysis of river sediment discharge, *Proceedings of the 2009 Korea Water Resources Association Conference*, pp. 723-727. [Korean Literature]
- Melville, BW, Coleman, S(2000). *Bridge Scour*. Water Resources Publications, Littleton, USA.
- Nam, SW(1978). Study on hydraulic analysis for sea defence works, *J. of Korean Society of Civil Engineers*, 26(2), pp. 93-100. [Korean Literature]
- Park, JE(1984). A numerical analysis of river-bed variation in alluvial stream, *J. of Korean Society of Civil Engineers*, 4(1), pp. 49-58. [Korean Literature]
- Teraguchi, H, Nakagawa, H, Muto, Y, Baba, Y, and Zhang, H(2008) Effects of groins on the flow and bed deformation in non-submerged conditions, *Disaster Prevention Research Institute Annuals Kyoto University*, 51(B), pp. 625-632.
- Teraguchi, H, Nakagawa, H, Zhang, H(2008). Study on flow and bed deformation around impermeable and permeable groins, *Proceedings of the 8th ICHD*, Nagoya, Japan, pp. 367-370.
- Uijtewaal, WS(2005). Effects of groyne layout on the flow in groyne fields: laboratory experiments, *J. of Hydraulic Engineering*, 131(9), pp. 781-791. [DOI:[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2005\)131:9\(782\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2005)131:9(782))]
- Yeo, HK, Roh, YS, Kang, JG, Kim, SJ(2006). Variations of flow thalweg alignment and separation region around a groyne, *J. of Korea Water Resources Association*, 39(4), pp. 313-320. [Korean Literature] [DOI:<https://doi.org/10.3741/jkwra.2006.39.4.313>]