

Original Article

베인 형태에 따른 하상세굴 저감 효과에 관한 연구

노해민¹ · 이호진^{2*} · 김성덕³

¹K-water 금강보관리단 대리, ²충북대학교 토목공학부 교수, ³충북대학교 토목공학부 강사

The Study for Reduction Effect of Riverbed Scour due to Shape of Vanes

Hae Min Noh¹, Ho Jin Lee^{2*}, and Sung Duk Kim³

¹Manager, Geumgang Weir Office Operations Team, K-water

²Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

³Instructor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

요약

기후변화로 인하여 발생하는 집중호우와 슈퍼태풍은 우리나라에서 많은 피해를 야기한다. 이러한 피해를 저감하기 위해서 다양한 형태의 하천정비사업이 추진되고 있으나, 홍수기와 갈수기가 뚜렷한 우리나라에서는 하천 균형을 유지하기가 어렵다. 특히, 하천정비 사업으로 설치된 하천구조물은 홍수기에 구조물 및 그 기초의 세굴이 발생되고 하상 변화 등 다양한 문제를 일으키고 있다. 이러한 하상세굴을 저감하기 위하여 하천의 만곡부에 다양한 베인이 많이 설치되며, 베인의 배치와 크기, 모양에 따라서 다양한 하상세굴 저감 효과가 나타난다. 베인은 원심력에 의해 발생하는 2차 흐름과 반대 방향으로 2차 흐름을 다시 생성함으로써 외측 하상 주변의 세굴이 감소하고 퇴적이 촉진된다. 본 연구의 이론은 질량보존법칙을 만족하는 연속방정식과 운동량 보존을 만족하는 운동량방정식을 적용한 지배방정식을 이용하고, 다양한 조건 하에서 베인의 영향을 조사하기 위해 설계 요인에 따라 전체 평균 유속 변화율을 측정한다. 사다리꼴 베인과 사각형 베인 모두에서 평균유속과 횡단면 유속이 모두 감소하였고, 이는 베인 설치로 인해서 원심력을 갖고 유하하는 하천유속이 방해 받아 유속이 저감되기 때문이다. 또한, 하천흐름 방향에 수직으로 또는 경사적으로 설치된 베인은 원심력에 의해 발생하는 2차흐름의 역방향으로 2차흐름을 발생시켜 원심력 2차흐름의 상쇄를 나타내기 때문에 베인의 효과가 나타난다.

핵심용어: 하상세굴, 베인, 기후변화, 운동량방정식

ABSTRACT

Recently, Heavy rains and super typhoons occurred by climate change cause a lot of damage in Korea. In order to reduce such damage, various types of river maintenance projects are being promoted, but it is difficult to maintain the balance of rivers in Korea with distinct flood and dry seasons. In particular, river structures installed as a river maintenance project cause various problems such as scouring of structures and their foundations during floods and river bed changes. In order to reduce such bed scour, various vanes are installed in the bend of the river, and various bed scour reduction effects appear depending on the size, arrangement, and shape of the vanes. The vane regenerates the secondary flow in the opposite direction to the secondary flow generated by the centrifugal force, thereby reducing scour around the outer bed and promoting deposition. The theory of this study uses the governing equation applying the continuity equation that satisfies the law of conservation of mass and the momentum equation that satisfies the conservation of momentum, and measures the overall average flow velocity change rate according to design factors to investigate the effect of vanes under various conditions. Both the average and cross-sectional flow velocities decreased in both the trapezoidal vane and the square vane. In addition, vanes installed perpendicularly or inclined to the direction of river flow generate a secondary flow in the opposite direction to the secondary flow generated by

*Corresponding author: Ho Jin Lee, hojinlee@chungbuk.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6771-5690>

Received: 2 June, 2023, Revised: 5 June, 2023, Accepted: 20 June, 2023



centrifugal force, thereby canceling the secondary flow of centrifugal force, so the effect of the vane appears.

Keywords: Riverbed scour, Vane, Climate change, Momentum equation

1. 서론

최근의 기후 변화로 발생하는 집중호우와 슈퍼태풍은 우리나라에서 하천수변에서 많은 피해를 야기한다. 이러한 피해를 저감하기 위해서 다양한 형태의 하천정비사업이 추진되고 있으나, 홍수기와 갈수기가 뚜렷하고, 지역별로 연도별로 강수량의 차이가 큰 우리나라에서는 하천 균형을 유지하기가 어렵다. 특히, 하천정비사업으로 설치된 여러 형태의 하천 구조물은 홍수기에 각 구조물 및 그 기초의 세굴이 발생하게 되고 하상 변화 등 다양한 문제를 일으킨다.

이러한 세굴을 저감하기 위하여 다양한 형태의 구조물이 제안되었고, 수제와 같이 유수의 침투에 의한 하안 또는 제방 보호 및 식생과 수생식물 서식지의 보호의 역할을 하는 구조물도 있다(KWRA, 2009). 수제와 관한 연구로는 Kim et al.(2003)은 이수 및 치수 그리고 하천제방 목적 외에 자연생태환경을 주 목적으로 자연형 수제배치를 연구하였고, Yeo et al.(2005, 2006)은 다양한 형태의 수제의 제원과 설치배치 등에 따른 세굴감소 효과를 수치모형실험으로 나타냈다. 또한, 수제 주변의 하천 흐름을 수치해석으로 분석하여 유사의 거동과 흐름의 상관성을 조사한 연구도 있으며(Park et al., 2011), 입자 형상 속도 측정을 이용하여 수리실험을 통해 수제 주변부의 흐름특성을 분석한 연구도 있다(Byun, 2013; Park, 2014). Brown(1985)은 실제 수제 제원의 설정이 어렵기 때문에 설계 길이와 투과성의 상관성을 연구하였고, 투과율과 하천폭의 비율에 따라 수제 설치 검토를 제시하였다.

본 연구에서는 이러한 하상세굴을 저감하기 위하여 하천의 만곡부에 수제의 한 일종인 베인을 검토한다. 베인은 하천 만곡부에서 발생하는 원심력의 2차 흐름과 반대 방향으로 2차 흐름을 다시 생성함으로써 외측 하상 주변의 세굴을 감소시키고 퇴적을 촉진시킨다. 따라서, 베인의 배치와 크기, 모양에 따라서 하천의 유속률과 세굴 감소 효과를 조사함으로써 베인에 의한 하천 만곡부에서의 하상세굴 저감효과의 성능을 분석한다. 본 연구에서의 지배방정식으로서 질량보존법칙을 만족하는 연속방정식과 운동량방정식을 적용하며 하천 만곡부에서 이차흐름의 유체 충격력이 외안 세굴에 어떠한 문제를 야기하는 지 조사한다. 유체의 운동성을 가진 지배방정식 이산화를 통한 베인과 하천 만곡부에 관한 수치모의를 진행하며, 베인을 설치할 때 설계 부분적 요소들(설치 각도와 간격, 반사율 등)이 하상높이와 하천유속에 미치는 영향을 분석하며, 수제를 실제 하천 만곡부에 설치하기 위한 기초 자료 제공을 목적으로 한다.

2. 기본이론

2.1 지배방정식의 적용

하천에서의 유체의 운동성을 분석하기 위해서는 검사체적의 접근방식을 이용한다. 검사체적의 접근방식은 레이놀즈 수송이론을 통해 유체시스템을 하천 횡단방향의 유체흐름으로 적용하면 라그랑지적 표현과 오일러적 표현이 함께 포함된 검사체적의 접근 기본방정식이 유도된다. 검사체적 접근 기본 방정식으로부터 하천 만곡부에서 유체질량보존법칙을 만족하는 연속방정식이 유도되고, 하상유동을 제어하는 베인을 설치 할 때 흐름의 방향과 흐름의 속도에 따른 횡단 분포가 필요하다(식 (1)).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{v}{r} = 0 \quad (1)$$

여기서, u, v, w 는 각각 x, y, z 축 방향 유속(m/s), r 은 곡률반경(m)을 나타낸다.

이에 따라서 하천 만곡부 시스템에서 유체의 충격력을 조사함으로써 세굴의 정도를 파악할 수 있으며, 이는 운동량방정식을 적용해야 한다. 식 (2)는 횡단방향에서의 운동량방정식을 나타내고, 식 (3)은 수심방향의 운동량 방정식을 나타낸다.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv}{r} = -g \frac{\partial z_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_x \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \delta_j \frac{f_{xj}}{\rho x_v} \quad (2)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{u^2}{r} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_x \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \delta_j \frac{f_{yj}}{\rho x_v} \quad (3)$$

여기서, z_x 는 수위(m), ν_y, ν_z 는 y, z 방향 와동점성계수(m^2/s), g 는 중력가속도(m/s^2), δ_j 는 j 번째 열 베인의 영향(1/m), f_{xj} 와 f_{yj} 는 베인에 의한 단위 높이당 항력과 양력(N/m), $\nu_y = \gamma_y u^* h, \nu_z = \kappa/3, \nu_z = \gamma_z u^* h, \nu_z = \kappa/6$, γ_y, γ_z 은 와동점성계수를 구하기 위한 카르만상수와 관련된 상수값, κ 는 카르만 상수 0.4, u^* 는 마찰속도(m/s)를 나타낸다.

또한, 하천의 만곡부에서는 유체의 원심력으로 인한 이차흐름이 발생하기 때문에 유체 회전과 관련된 와도방정식으로 변환하여, 이차류로 인한 횡단 분포에 관한 방정식을 유도한다(식 (4)). 이때, 국부와 이류 및 구심가속도를 적용하며, 하천의 흐름 연직방향을 제외한 횡단방향 및 종단방향에 따른 인자의 변화는 없다고 가정한다(Noh, 2019).

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \quad (4)$$

여기서, ω 은 와도를 나타낸다.

식(1)~(4)를 적용하기 위해서는 하천 만곡부의 수평평면에서 u, v, w, ω 의 속도분포가 필요하며, 이 속도분포는 복잡하기 때문에 실제 적용을 위해서는 검사체적 접근방정식에서 검사체적의 집적의 변화가 없다고 가정하여 단순화한다(Fukuoka and Watanabe, 1992).

$$u = U + \frac{\pi}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2}\xi\right) - 1u_d = U + u_d \phi_1(\xi) \quad (5)$$

$$v = -v_x \cos(\pi\xi) = v_x \phi_2(\xi) \quad (6)$$

여기서, ξ 는 수심 관련 상수(h =수심, z_b =하상높이, z 는 z 방향좌표), U 는 종단방향 수심 평균유속(m/s), u_d 는 연직방향 유속편차(m/s), v_x 는 횡단방향 수면유속(m/s)이다.

2.2 적분방정식의 이산화

하천 수로 또는 만곡부에서 유체의 질량과 운동성, 충격력을 적용하기 위해서는 지배방정식으로 기인한 적분방정식을 이산화해야 한다. 수로 횡단 방향 폭 B 를 N 등분을 격자화하며, 각 격자점을 배치하고 각 격자 간격을 Δy 라고 한다. 격자의 경계에는 유량을 격자 중심에는 유속을 배치하는 것이 수치모의를 하는 데 유리하기 때문에, 각 격자점에 각 변수를 유리하게 배치한 후에 적분 방정식들을 이산화한다. 각 격자점에는 첨자 i 를, i 격자점의 왼쪽 $\Delta y/2$ 에는 $i-1/2$, 오른쪽 $\Delta y/2$ 에는

$i+1/2$ 를 나타낸다. 식 (2)와 식 (3)을 해석함으로 적분방정식이 만들어지며, 이 식에 격자점 왼쪽부터 오른쪽까지 적분하면 (왼쪽: $\Delta y/2$, 오른쪽: $\Delta y/2$), 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{12}v_{x,i}(u_{d,i+1} - u_{d,i-1}) = gi_0\Delta y + \nu_{y,i+1/2} \frac{U_{i+1} - U_i}{\Delta y} - \nu_{y,i-1/2} \frac{U_i - U_{i-1}}{\Delta y} - \frac{f_b u_{b,i}^2}{h_i} \Delta y - \delta_v^* K_D (C_{v0} U_i^2 - 2C_{v1} U_i u_{d,i}) \tag{7}$$

$$C_{12} = \frac{1}{3}, C_{v0,i} = \frac{h_{v,i}}{h_i}, C_{v1,i} = \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{h_{v,i}}{h_i}\right) + \frac{h_{v,i}}{h_i} - 1 \tag{8}$$

여기서, C_{12} , $C_{v0,i}$, $C_{v1,i}$ 는 각각 방정식에서의 계수, $h_{v,i}$ 는 베인이 i 번째 격자에서 하상으로부터 노출된 높이, h_i 는 i 번째 격자에서의 수심, $v_{x,i}$ 는 i 번째 격자에서의 횡단방향 수면 유속(m/s), $u_{d,i}$ 는 i 번째 격자에서의 종단방향 유속 기울기, Δy 는 격자 간격(m), $\nu_{y,i}$ 는 i 번째 격자에서의 횡단방향 동점성 계수(m^2/s), U_i 는 i 번째 격자에서의 종단방향 평균유속(m/s), f_b 는 하상마찰계수, δ_v^* 는 베인 설치 여부 계수(베인 설치 시 1, 미설치 시 0), K_D 는 항력 계수이다.

3. 수치결과 및 분석

3.1 수치모의

하천 만곡부 및 하천수로에서 유체가 운동성을 가지고 외안에서는 세굴을 내안에서는 퇴적을 반복하면서 유하하기 때문에 시간변화에 대한 유체의 변동성을 조사해야 한다. 이 때 시간변화에 대한 유체의 해석을 효과적으로 수행할 수 있는 수치 모델은 유한차분법(Finite Differential element Method)이며 이것을 이용하여 지배방정식 및 적분방정식에 적용하면, 시간 변화에 대한 유체 및 유사의 흐름특성 등의 분석이 가능하다. 지배방정식에 대한 이산화는 식 (7)과 식 (8)로 나타냈고, 수면 상 격자에서의 변수와 격자 중앙에서의 변수를 배치하여 수치계산을 수행한다. 이 때 시간 레벨을 설정함으로써 시간 변화 (Δt)에 대한 Δy 격자 간격에서의 수치모델이 계산된다.

수치모의 조건으로서 베인의 제원(개수, 모양, 크기, 간격, 감쇠공 유무) 등 다양한 조건에 따라 하천 수로 또는 만곡부에서

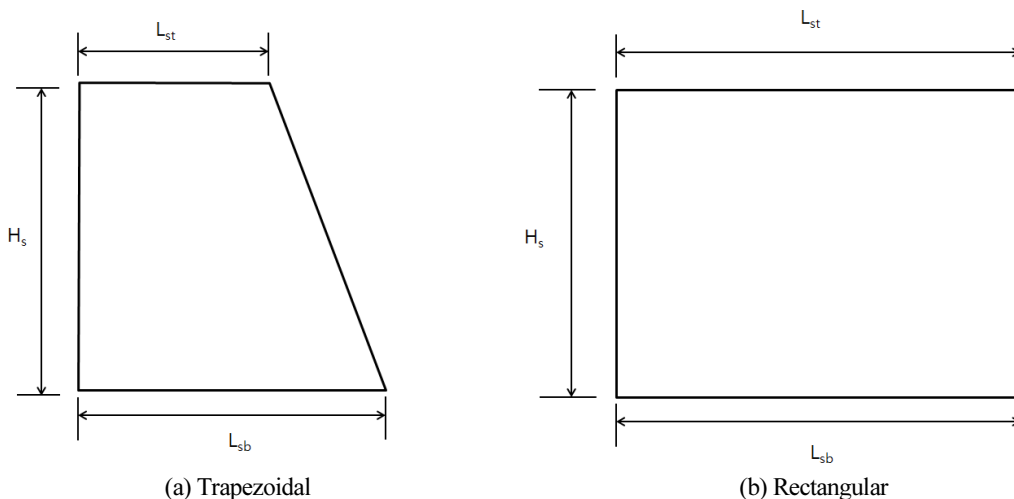


Fig. 1. Configure of vane

횡단방향의 수면유속, 수류의 평균유속, 하상 변동을 알아보기 위해 수치모의를 진행한다. 수치모의하천에서의 평균유속 (U)은 그 최댓값이 0.6827m/s, 횡단방향(x) 수면유속(v_x)의 최댓값은 0.0748m/s 이다. 하천 만곡부에서 유속은 내안에서 외안으로 갈수록 빨라지고, 횡단방향 수면유속(v_x) 또한 빨라지기 때문에, 그에 따른 이차류의 하상파가 강화되어 하천의 외안의 하상에서 세굴이 발생하고, 하천 내안에서는 퇴적(하드포인트)이 발생할 것이다. 외안에서의 침식 또는 세굴을 감소시키기 위해서는 이것을 제어할 수 있는 베인과 같은 수중수제가 필요하다.

Fig. 1은 하천 만곡부에 설치된 베인의 형태를 나타내며, 여기서, L_{st} 는 베인의 상단 길이(m), L_{sb} 는 베인의 하단 길이(m), H_s 는 베인의 높이(m)를 나타낸다.

3.2 수치결과분석

본 연구에서의 수치모의하천에서 설치된 베인은 사다리꼴 형태와 사각형 형태의 조건으로 적용하고, 설치각도가 15도 인 경우 베인 1기 설치시 평균유속(Fig. 2(a)), 횡단방향 수면유속(Fig. 2(b)), 하천 횡단면의 하상높이(Fig. 2(c))를 유한차분법을 적용하여 수치모의 하였다. Fig. 2에서 세로축은 평균 및 횡단면 유속, 하상높이를 나타내고 가로축은 하천횡단면 거리를

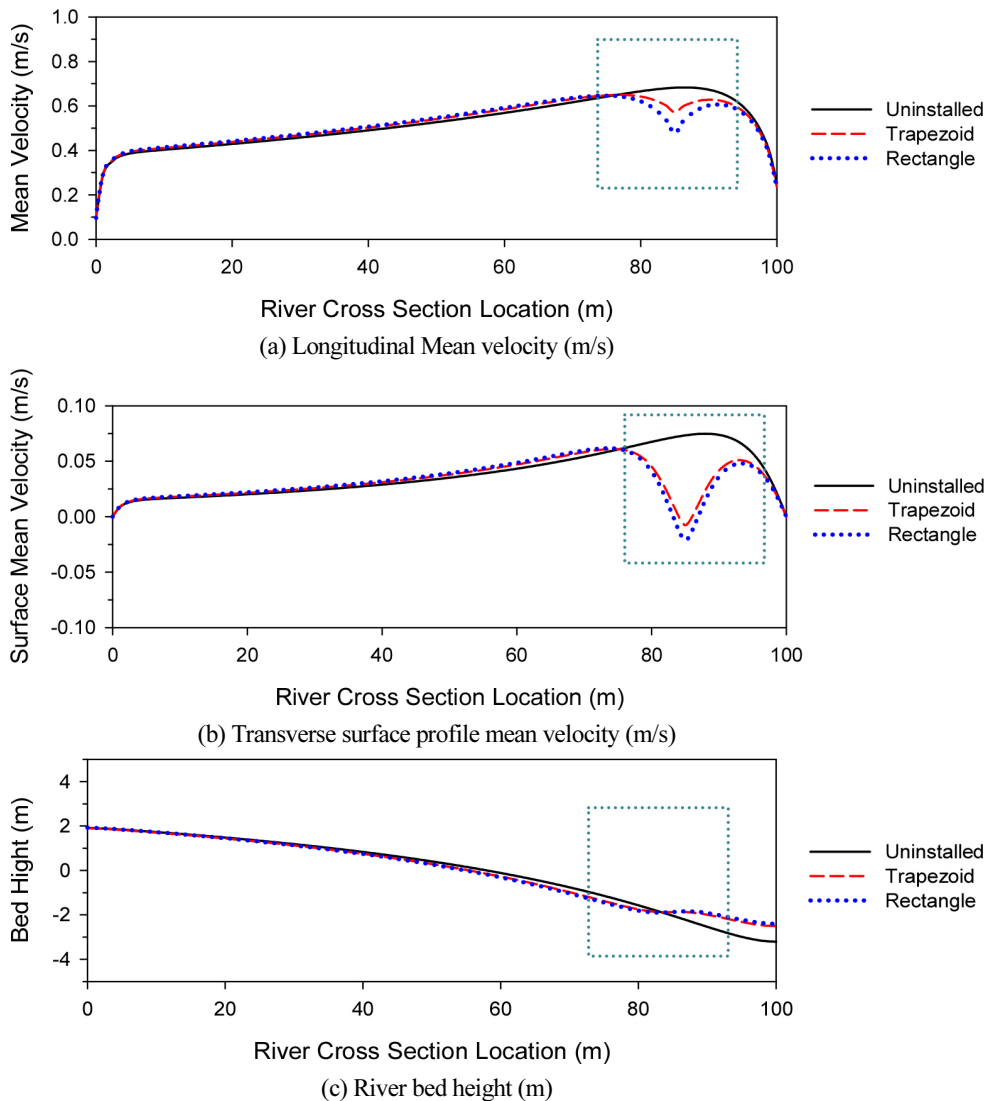


Fig. 2. The longitudinal mean velocity, transverse surface profile mean velocity, and river bed height at installation of one vane for 15 degree

나타내고, 실선은 베인 미설치 시의 결과이고, 슬래시 선은 사다리꼴 형태의 베인 설치시, 점선은 사각형 베인 설치시 결과를 나타낸다.

Fig. 1에서 보면 사다리꼴 베인과 사각형 베인 모두에서 평균유속과 횡단면 유속이 모두 감소한 것으로 나타났고, 이는 베인 설치로 인해서 원심력을 갖고 유하하는 하천유속이 방해받음 유속이 저감되기 때문이다. 또한, 하천 만곡부 외안에서의 세굴은 하천 하상과의 2차 흐름으로 인해 크게 발생하기 때문에 세굴을 감소시키기 위해서는 2차 흐름의 방해가 필요하다. 이 때, 하천흐름 방향에 수직으로 또는 경사적으로 설치된 베인은 원심력에 의해 발생하는 2차흐름의 역방향으로 2차흐름을 발생시켜 원심력 2차흐름의 상쇄를 나타내기 때문에 베인의 효과가 나타난다.

사다리꼴 베인 1기를 16도 각도로 설치했을 때 외안에서부터 15m 지점 평균유속은 16.2% 감소하였고, 하상높이는 8% 상승했고, 사각형 베인 1기 설치한 경우 평균유속은 30.3% 감소하였고, 하상높이는 8.3% 상승했다.

4. 결론

최근의 기후변화로 인한 집중호우와 슈퍼태풍은 우리나라에서 하천수변에서 많은 피해를 야기한다. 하천 만곡부에서의 세굴을 저감하기 위하여 다양한 형태의 구조물이 제안되었고, 하상세굴을 저감하기 위하여 하천의 만곡부에 수제의 한 일종인 베인을 검토하였다. 베인은 하천 만곡부에서 발생하는 원심력의 2차 흐름과 반대 방향으로 2차 흐름을 다시 생성함으로써 외측 하상 주변의 세굴을 감소시키고 퇴적을 촉진시킨다. 따라서, 베인의 배치와 크기, 모양에 따라서 하천의 유속률과 세굴 감소 효과를 조사함으로써 베인에 의한 하천 만곡부에서의 하상세굴 저감효과의 성능을 분석하였다. 본 연구에서의 지배방정식으로서 질량보존법칙을 만족하는 연속방정식과 운동량방정식을 적용하며 하천 만곡부에서 이차흐름의 유체 충격력이 외안 세굴에 어떠한 문제를 야기하는 지 조사하였다.

본 연구에서의 수치모의하천에서 설치된 베인은 사다리꼴 형태와 사각형 형태의 조건으로 적용하였고, 설치각도가 15도인 경우 베인 1기 설치시 평균유속 및 횡단방향 수면유속, 하천 횡단면의 하상높이를 유한차분법을 적용하여 수치모의 하였다.

사다리꼴 베인과 사각형 베인 모두에서 평균유속과 횡단면 유속이 모두 감소하였고, 이는 베인 설치로 인해서 원심력을 갖고 유하하는 하천유속이 방해받음 유속이 저감되기 때문이다. 또한, 하천흐름 방향에 수직으로 또는 경사적으로 설치된 베인은 원심력에 의해 발생하는 2차흐름의 역방향으로 2차흐름을 발생시켜 원심력 2차흐름의 상쇄를 나타내기 때문에 베인의 효과가 나타난다.

사다리꼴 베인 1기를 16도 각도로 설치했을 때 외안에서부터 15m 지점 평균유속은 16.2% 감소하였고, 하상높이는 8% 상승했고, 사각형 베인 1기 설치한 경우 평균유속은 30.3% 감소하였고, 하상높이는 8.3% 상승했다.

본 연구의 결과는 하천정비사업 또는 하천 만곡부에서의 세굴을 저감하기 위해서 실제 하천 만곡부에서 수제 설치를 위한 기초 자료를 제공하며, 다양한 형태의 베인 배열에 대한 상세제원에 관한 연구가 더 필요하다.

References

- Brown, S. A. (1985). Design of Spur-Type Streambank Stabilization Structures. U.S. DOT FHWA. Report No. FHWA/RD-84/101.
- Byun, Hyun Hyuk. (2013). Analysis of Three-dimensional Flow Characteristics around a Groyne by PIV Hydraulic Experiments. M.S. Thesis. Myongji University.
- Fukuoka, S. and A. Watanabe. (1992). Theoretical Study of Flow and Bed Profiles in Vane Installed Curved Channels. Japanese Society Civil Engineering. 1992(447): 45-54.
- Kim, Jin Hong, Hyo Sub Woo, Sung Sik Ahn, and Yong Min Wee. (2003). Development of Natural Groin - Targeting Medium-sized Rivers -. Proceedings of the Korea Water Resources Conference. 409-412.

- Korea Water Resources Association. (2009). Explanation of River Design Standards. Seoul: KWRA.
- Noh, Hae Min. (2019). An Analysis on the Characteristics of Submerged Vane on Riverbed Scour in Meandering River. M.S. Thesis. Chungbuk National University.
- Park, Hyo Gil, Sung Soon Jung, Chul Moon Kim, Won Sik Ahn, and Hong Kee Jee. (2011). The Study on Stability Channel Technology by Using Groyne in Alluvial Stream - Riverside Protection Techniques by Using Groyne -. Journal of Wetlands Research. 13(1): 79-94.
- Park, Kab Yul. (2014). Analysis of Flow Characteristics around Vertical Groynes Associated with Various Groyne Spacing Using PIV. M.S. Thesis. Myongji University.
- Yeo, Hong Koo, Joon Gu Kang, Sung Jung Kim, and Young Sin Rho. (2005). Experimental Study on Groynes Length and Permeability Change in Flat-Bed Channel Flow. Proceedings of the Korea Water Resources Conference. 959-964.
- Yeo, Hong Koo, Joon Gu Kang, Sung Jung Kim, and Young Sin Rho. (2006). An Experimental Study on Scout Area around Groynes with Permeability and Install Angle. Journal of Korea Water Resources Association. 39(7): 583-592.

Korean References Translated from the English

- 김진홍, 우효섭, 안성식, 위용민 (2003). 자연형 수제의 공법 개발 - 중규모 하천을 대상으로 -. 한국수자원학회 학술대회. 409-412.
- 노해민 (2019). 하천만곡부 하상세굴에 미치는 수중수제의 특성분석. 석사학위논문. 충북대학교.
- 박갑렬 (2014). PIV 기법을 이용한 직각수제의 설치간격 변화에 따른 흐름특성 분석. 석사학위논문. 명지대학교.
- 박효길, 정성순, 김철문, 안원식, 지홍기 (2011). 충적하천에서 수제에 의한 안정하도 확보기술에 관한 연구 - 수제에 의한 하안 보호 기법 -. 한국습지학회지. 13(1): 79-94.
- 변현혁 (2013). PIV 수리실험을 통한 수제 주변의 3차원적 흐름 특성 분석. 석사학위논문. 명지대학교.
- 여흥구, 강준구, 김성중, 노영신 (2005). 수제길이와 투과율에 따른 수로흐름에 대한 실험적 연구. 한국수자원학회 학술대회. 959-964.
- 여흥구, 강준구, 김성중, 노영신 (2006). 투과율과 설치각도에 대한 수제 주변 세굴영역에 관한 실험 연구. 한국수자원학회 논문집. 39(7): 583-592.
- 한국수자원학회 (2009). 하천설계기준·해설. 서울: 한국수자원학회.