

수제 입사각에 따른 개수로 만곡부의 편수위와 하상변동

박상덕* · 백중철** · 전우성*** · 이현재****

Park, Sang Deog*, Paik, Joongcheol**, Jeon, Woo Sung***, Lee, Hyun Jae****

Superelevation and Bed Variation Due to Attack Angle of Submerged Vanes in Curved Channel

ABSTRACT

Since the centrifugal force acts on the flow in the curved channel, a transverse water surface gradient occurs and the thalweg is biased toward the outer bank. The submerged vanes may be used to solve various engineering problems of the curved channels. In order to analyze the influence of an attack angle and the distance between the vane arrays on the river bed variation and the superelevation in a bend, movable bed hydraulic experiments were conducted in a 90° curved rectangular channel of a small-size gravel bed. Installing the submerged vanes in the bend increases the maximum scour depth. But if vanes are installed in a uniform obtuse angle, the scour depth may be reduced. If the flow rate in the channel bend with vanes equals to the channel forming discharge, the location of the maximum scour depth moved to the downstream and the superelevation increased. However if the flow rate is smaller than that, the location of the maximum scour depth moved upstream and the superelevation decreased. The channel bed change and the superelevation due to the installation of the submerged vanes have been dependent on the interaction of the attack angle, the flow rate, and the distance between the arrays.

Key words : Submerged vane, Channel bend, Scour, Maximum scour depth, Superelevation

초 록

개수로 만곡부에서 흐름은 원심력이 작용하기 때문에 횡방향 수면경사가 나타나고 유심선은 만곡 외측으로 치우친다. 수중 수제는 만곡부의 다양한 공학적인 문제를 해결하는 데 사용될 수 있다. 수중 수제가 흐름방향과 이루는 입사각과 수제 열 간격이 만곡부의 하상변동과 편수위에 미치는 영향을 파악하기 위해서 90°만곡 직사각형 단면 수로에 잔자갈을 깔고 이동상 수리실험을 하였다. 만곡부에 수중 수제를 설치하면 최대 세굴심은 증가하나 균일한 둔각으로 수제를 설치하면 세굴을 줄일 수 있다. 수제를 설치한 만곡부에 수제설치 기준하상의 형성유량과 같은 유량이 흐를 경우 최대 세굴이 발생하는 위치가 하류로 이동하고 편수위는 증가한다. 그 유량보다 작으면 최대 세굴심의 위치가 상류로 이동하며 편수위는 감소한다. 만곡부에서 수중 수제는 입사각, 유량, 수제 열 간격의 상호작용에 따라 하상변동과 편수위에 대한 영향이 다르다.

검색어 : 수제, 만곡부, 세굴, 최대세굴심, 편수위

* 종신회원 · 교신저자 · 강릉원주대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Gangneung-Wonju National University · sdpark@gwnu.ac.kr)

** 종신회원 · 강릉원주대학교 토목공학과 교수 (Gangneung-Wonju National University · paik@gwnu.ac.kr)

*** 정회원 · 강릉원주대학교 토목공학과 석사과정 (Gangneung-Wonju National University · jws92333@naver.com)

**** (주)한국종합기술 수자원부 부사장, 공학박사 (Korea Engineering Consultants Corporation · leehj82@kecc.co.kr)

Received November 26, 2018/ revised December 24, 2018/ accepted February 7, 2019

1. 서론

홍수 시 하천 만곡부에서 흐름은 원심력이 작용하기 때문에 이차류가 발달하고, 만곡외측 하상이 국부적으로 세굴되며, 횡단면 수면경사가 커서 하천피해가 만곡수충부에 집중된다. 수중수제(submerged vane)는 하천의 만곡부에 설치하여 하안침식과 편수위를 줄여 하천피해를 방지하는 데 사용할 수 있다(Odgaard and Kennedy, 1983; Odgaard and Mosconi, 1987; Odgaard and Wang, 1991b; Johnson et al., 2001). 일반적으로 수제(super dike, groyne)는 홍수 시 잠기고 평시에는 수면 위로 드러난다. 수제는 유속분포와 유사이송을 제어하므로 하천의 치수, 이수, 생태환경 적인 측면에서 다양하게 활용되는 수공구조물이다. 수제의 종류는 배치방법에 따라 흐름방향을 기준으로 횡수제와 평행수제로 구분할 수 있다. 횡수제는 하향수제와 상향수제가 있다. Fig. 1에서 흐름(외측벽) 방향이 수제와 이루는 흐름 우측의 각도를 입사각(attack angle)이라 하면 하향수제는 예각으로 설치한 수제이고, 상향수제는 둔각으로 설치한 수제를 의미한다. 홍수 시에 이 수제들이 잠기면 수중수제가 된다. 국내에서 수제에 대한 연구는 수제의 길이, 투과율, 경사수제 등에 따른 수제 주변 흐름구조를 파악하는 연구가 주로 이루어졌다(Kang et al., 2005; Yeo et al., 2006; KWRA, 2009; Kim et al., 2014; Lee, et al., 2018).

두께가 얇은 수중수제는 흐름의 구조를 조절하여 하상과 하안에 필요한 유사이송 등의 영향을 유도하고 특정한 방향으로 물을 유도하기 위한 효과적인 방법이다. 이에 대한 연구는 많이 있으며 수제의 공간적인 배열과 형상이 하상과 흐름에 미치는 영향을 파악하는데 집중되어 있다(Wang, 1991; Odgaard and Wang, 1991a, Ouyang et al., 2008). 그러나 수제(groyne)와 같이 비교적 두께가 크면서도 수중 수제(vane)와 같이 두께가 얇은 수중 수제의 특성을 지닌 비교적 두꺼운 수중 수제가 흐름과 하상에 작용하는 현상에 대한 연구는 미흡하다. 일반적으로 산지하천은 하상경사가 1/500 이상으로 급하기 때문에 대부분 자갈하상 하천이다(Wohl, 2000). 우리나라는 국토면적의 약 63 %가 산지이므로 자갈하천이 매우 많은 것으로 추정되나 이에 관한 정량적인 조사는 미흡하다. 산지하천에서 만곡부는 직선구간에 비하여 하폭이 상대적으로 넓

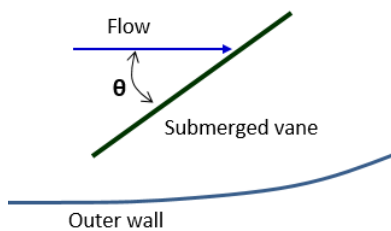


Fig. 1. Attack Angle between Flow and Submerged Vane

고 만곡외측으로 수면상승이 크며 하상세굴이 발생한다. 산지하천에서 만곡외측을 따라 농경지나 도로 등이 발달되어 있는 경우 하천홍수에 의한 제내지 피해를 줄이기 위한 기법으로서 수제의 활용 가능성에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구는 직사각형 단면 90°만곡 수로에 잔자갈을 깔고 비교적 두꺼운 수중 수제를 만곡 외측벽에서 이격하여 예각과 둔각으로 설치할 때 만곡부의 하상과 편수위를 수리실험으로 조사한다.

2. 이동상 수리실험

2.1 실험수로

수리실험은 폭 1.45 m, 높이 1 m, 길이 24 m 인 직사각형 단면 90°만곡수로에 잔자갈을 0.3~0.5 m의 깊이로 깔고 초기의 하상경사 또는 수제설치 기준 종횡단면으로 정리한 개수로에서 이루어졌다(Fig. 2). 이 수로의 실험유량은 2대의 펌프를 가진 순환시스템으로 공급하였으며, 초음파유량계(모델 : TDS-100F1)

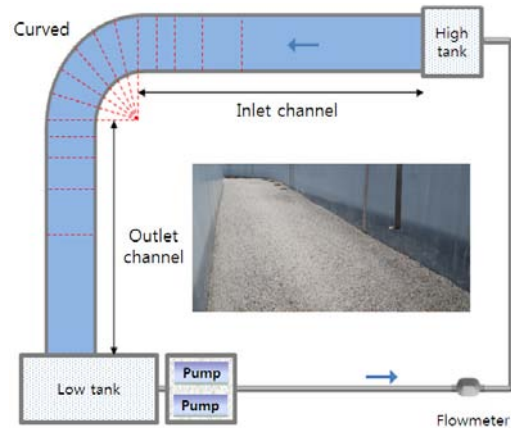


Fig. 2. Experimental 90° Curved Channel

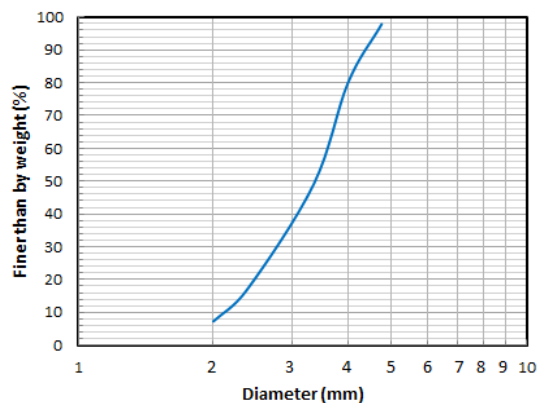


Fig. 3. Size Distribution of Bed Material

를 이용하여 유량을 측정하였다. 하상경사는 수로의 중앙선을 기준으로 맞추었다. 하상에 간 잔자갈의 입도분포는 Fig. 3과 같고 그 중앙입경 d_{50} 은 3.3 mm이다. 일반적으로 산지하천은 자갈하천이며 모래에서 전석에 이르기까지 하상재료의 입경 변화가 매우 심하다. 그 하상표면 재료의 평균입경은 상류에서 하류로 갈수록 감소하고 30~200 mm의 범위를 나타내며 크기 등급은 매우 굵은 자갈에서 큰 호박돌에 해당한다(Shin et al., 2012; Yang et al., 2014). 이것은 모래하천에 비하면 15~100배나 큰 입경이다. 산지하천과 같은 자갈하천 만곡부에 수제를 설치할 경우 하상의 반응을 조사하기 위하여 본 연구에서는 잔자갈을 하상재료로 선정하여 실험하였다.

2.2 실험조건 및 방법

본 연구의 실험조건은 Table 1과 같다. 실험번호 N1과 N2는 수제 설치에 필요한 기준 하상단면을 설정하기 위한 실험이다. 실험번호 N1은 하상경사 S_o 를 1/150로 정리한 수로에서 183.0 l/s의 실험유량 Q 를 흘린 실험이다. 이 실험에서 얻어진 중횡단 하상형상은 V1과 V2실험에서 수제설치 및 하상정리의 기준이 된다. 또한 N2는 하상경사를 1/300으로 정리한 수로에 163.7 l/s의 유량을 공급한 실험이다. 이에 따라 얻어진 중횡단 하상단면은 V3~V6실험에서 수제설치 및 하상정리의 기준으로 삼았다. 모든 실험은 하상이 변하지 않도록 수로에 물을 서서히 채워 하상이 완전히 물에 잠길 때 유량과 수위를 조절하여 목표한 실험조건에 도달한 이후부터 3시간동안 실험유량을 공급하였다. 실험 중에는 수위, 유량, 유속 등을 측정하고 실험이 종료된 후에는 하상고를 측정하였다. 하상고는 광학레이저센서(모델 : ODSL 9/V6.XL-450-S12)가 장착된 하상측정기를 이용하여 측정하였다. 유속은 측정 위치와 시간을 제어할 수 있는 장치에 초음파유속계(모델: 16 MHz MicroADV)를 결합하여 측정하였다. Table 1에서 θ 는 수제 입사각이고 S_o 는 하상경사이다. 상류 수제와 하류 수제 사이의 거리 L_v 는 Eq. (1)과

같고 수제 열 사이의 간격 D_i 는 Eq. (2)로 나타낸다.

$$L_v = C_L \times H \tag{1}$$

$$D_i = C_{Li} \times H \tag{2}$$

여기서, H 는 수제의 높이로서 평균하상고를 기준으로 한 높이이다. C_L 은 상류와 하류 수제의 수로방향 거리에 관한 계수이며 C_{Li} 는 수제 열의 간격에 관련된 계수이다. 수제가 설치된 만곡부를 흐르는 유량이 수제설치에 필요한 기준하상의 형성유량과 다를 때 하상변동과 편수위에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Eq. (3)과 같이 Q_r 을 정의하였다.

$$Q_r = \frac{Q}{Q_c} \tag{3}$$

여기서, Q 는 수제를 설치한 경우 실험유량이고 Q_c 는 수제를 설치하기 위한 기준하상의 형성유량이다. Q_r 은 V1과 V2 실험에서는 약 0.895이고 V3에서 V6까지는 약 1.0이다. 수제는 홍수 시 안정성이 확보되어야 하므로 하도형성 유량 등과 같은 특정한 홍수량 조건으로 설계할 수 있다. 이 수제는 설계에 고려한 홍수보다 더 작은 규모의 수많은 홍수들을 겪으면서 흐름과 하상에 영향을 줄 것이다. 따라서 Q_r 이 1보다 작은 실험은 수제의 설계조건보다 작은 유량이 흐름 경우 수제가 만곡부의 하상에 미치는 영향을 파악할 수 있게 한다.

2.3 수제설치

수제는 폭 42 mm이고 길이 84 mm인 직사각형 단면의 목재로 제작하였다. 수제 높이는 설치할 위치에서 횡단면의 평균하상고를 기준으로 28 mm로 하였다. 수제의 평면적인 배치는 수로를 따라

Table 1. Experimental Conditions

No.	Submerged vane					Q (l/s)	S_o	d_{50} (mm)	Remark
	Cross-sectional criteria	H (mm)	C_L	θ ($^\circ$)	C_{Li}				
N1	None					183.0	1/150	3.3	Without vanes
N2	None					163.7	1/300	3.3	
$Q_r < 1$	V1	N1	28	15~30	5~20	1.5	166.1	N1	With vanes
	V2	N1	28	15~30	160~175	1.5	162.0	N1	
$Q_r = 1$	V3	N2	28	15~30	160~175	1.5	163.6	N2	
	V4	N2	28	15~30	160~175	3	164.5	N2	
	V5	N2	28	15~30	160~175	3	163.6	N2	
	V6	N2	28	15~30	160	3	163.8	N2	

Table 2. Plane Arrangement and Attack Angle of Vanes Along a Line in Case of Acute Angle (in N1)

Channel	Angle in bend (°)	Distance between vanes		θ (°)	Remarks
		C_L	L_v (m)		
Straight		0	0	20	1st vane
		30	0.84	20	
Curved	0	30	0.84	20	
	9	25	0.70	20	
	18	23	0.64	15	
	25	20	0.57	15	
	31	15	0.42	10	
	37	15	0.42	10	
	43	15	0.42	10	
	49	15	0.42	5	Impingement center
	57	20	0.56	10	
	65	23	0.64	15	
	75	25	0.69	20	
	85	30	0.84	20	
Straight		30	0.84	20	15 th vane

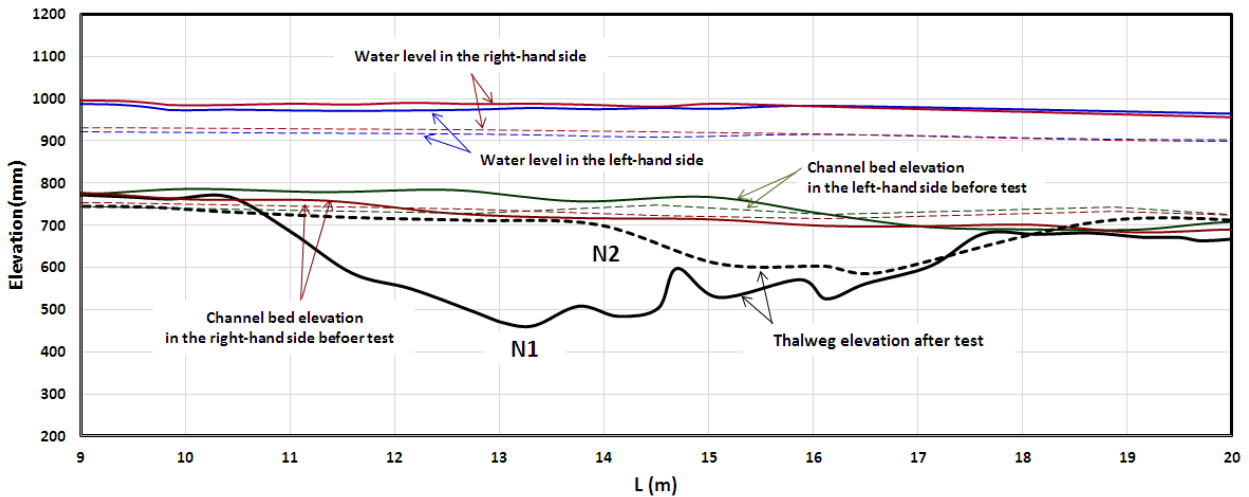


Fig. 4. Thalweg Profile After N1 and N2 Experiments

2열로 하였다. 수로의 우측 벽에서 수제 열까지 이격거리는 $3H$ 이다. 상하류 수제거리계수 C_L 은 만곡 수층부 중심에 설치한 수제를 기준으로 상류와 하류 방향으로 멀어질수록 15부터 최대 30까지 증가시켰다. 수제 입사각은 수층부 중심 수제를 예각 5° 와 둔각 175° 로 설치하고 상류와 하류 방향으로 멀어질수록 각각 최대 20° 와 최소 160° 까지 변화시켰다. 만곡수층부 중심의 위치는 수제 설치 기준단면에서 최대세굴심이 발생한 지점이며 N1 실험에서는 만곡부의 49° 지점이다. Table 2는 수제 열을 따라 수제들의 위치와 입사각을 나타낸다.

3. 실험결과

Fig. 4는 수로의 중앙선을 따라 각 단면에서 가장 낮은 하상고의 종단적인 변화와 실험전과 후의 하상고, 실험중의 수위를 나타낸다. 여기서 실선은 N1 실험이고 점선은 N2 실험에 대한 것이다. Table 3은 실험결과 최심하상고와 편수위를 나타낸다. 여기서 h 는 수심, V 는 평균유속, F_r 은 Froude수로서 $L=9.3$ m 지점의 만곡전 접근수로 단면에서 수리량들이다. 또한 $d_{s, \max}$ 는 최대세굴 하상의 높이, L_s 는 최심하상고의 위치를 수로의 우안 거리로 나타내었고, 편수위

Table 3. Experimental Results

No.	Q (l/s)	h (m)	V (m/s)	F_r	Max. scour depth		Superelevation (mm)		Increasement		
					$d_{s\ max}$ (m)	L_s (m)	1 st (Location, m)	2 nd (Location, m)	$d_{s\ max}$ (mm)	Rate of 1 st superelevation	
N1	183.0	0.194	0.66	0.48	0.462	13.30	18 (12.16)	16 (11.01)			
N2	163.7	0.181	0.63	0.47	0.587	16.63	11 (14.52)	9 (12.76)			
$Q_r < 1$	V1	166.1	0.179	0.64	0.48	0.428	13.95	16 (12.76)	15 (14.52)	34	-0.111
	V2	162.0	0.180	0.63	0.47	0.411	14.37	16 (11.03)	15 (12.76)	51	-0.111
$Q_r = 1$	V3	163.6	0.181	0.63	0.47	0.549	13.38	14 (12.76)	10 (14.52)	38	0.273
	V4	164.5	0.175	0.64	0.49	0.531	12.77	19 (15.10)	16 (13.91)	56	0.727
	V5	163.6	0.197	0.57	0.41	0.544	14.10	21 (12.76)	20 (13.95)	43	0.909
	V6	163.8	0.191	0.59	0.43	0.591	14.49	18 (15.10)	17 (13.95)	-4	0.636



(a) V1



(b) V2

Fig. 5. Photos After Experiments (V1, V2)

의 위치는 수로 중심선 거리로 나타내었다. Fig. 4에서 실험 N1과 N2는 수제설치 기준하상을 설정하기 위한 것인데, N1이 N2보다 만곡부 하상세굴의 규모가 훨씬 더 크다. N1과 N2의 실험조건 차이는 초기하상경사, 유량, 평균유속에 있다. N2에 비하면 N1의 초기하상경사는 2배나 더 급하고 유량은 약 11.8 % 많으며 평균유속은 4.8 % 크다. 따라서 세굴규모의 큰 차이를 유발한 것은 유수력의 차이에 따른 것으로 생각되며 $L=14.6$ m 부근에서 최심하상변동이 큰 것은 하상파에 기인한 것이다. 이와 같은 결과는 초기경사기준에 따라 하상을 정리하고 실험유량을 공급한 3시간동안에 N2는 평형하상에 거의 도달하였으나 N1은 아직 충분한 평형상태에 도달하지 않았기 때문에 판단된다. 이 같은 이유로 N1기준으로 수제를 설치한 실험들에서는 하상형성 유량의 10 %내외를 줄인 실험유량을 공급하였다. 그러나 N2를 기준으로 한 실험들에서는 하상의 형성유량과 거의 같은 유량을 공급하였다. N1에서 최대세굴심의 위치는 만곡부 49°부근이나 N2실험에서는 그 보다 훨씬 하류인 만곡부 출구 부근에서 최대세굴심이 발생하였다. 만곡부에 수제를 설치하면 수제를 설치하지 않을 때에 비하여 최심하상고가 더 낮아지고 최대 편수위는 V1과 V2에서는 감소하였으나 V3~V6에

서는 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 V6의 최대 세굴심은 오히려 감소하였다. 최대세굴심의 위치는 N1, V1, V2 실험의 경우 수제설치에 따라 하류로 이동하였으나 N2, V3, V4, V5, V6 실험에서는 오히려 상류로 이동하였다.

4. 하상변동과 편수위에 대한 수제의 영향

4.1 입사각의 영향

4.1.1 불균일 수제 열 입사각의 예각과 둔각

만곡부에 수중 수제를 설치하면 Figs. 5 and 6에서 알 수 있듯이 수제 주변에서 세굴이 발생한다. 그 양상은 수제의 입사각이 예각이나 둔각이냐에 따라 큰 차이를 나타내고 있다. 즉, 예각인 V1 실험에서는 최심하상고의 종단적 변화가 비교적 완만하나, 둔각인 V2실험에서는 세굴이 크고 집중적이며 변화가 심하다. 편수위는 수제 설치로 약간 감소하나 예각과 둔각에 따른 편수위 크기의 차이는 없었다. 다만 최대 편수위 발생위치는 예각의 경우 하류로 이동하고 둔각에서는 상류로 이동하였다. 제2위 크기의 편수위는 하류로 이동하였다. 따라서 예각과 둔각이 편수위의 크기에 미치는

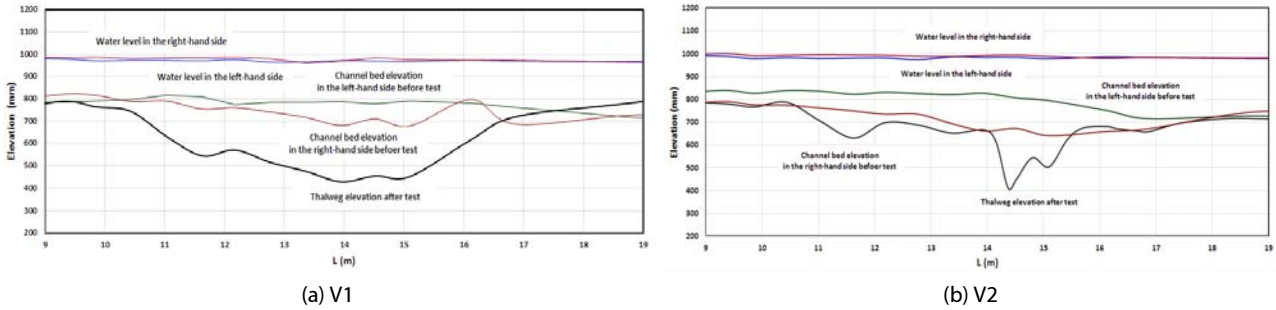


Fig. 6. Thalweg Profile After Experiments (V1, V2)

Table 4. Plane Arrangement and Attack Angle of Vanes Along a Line in Case of Acute Angle (in N2)

Channel	Angle in bend (°)	Central line of channel (m)	Distance between vanes		θ (°)		Remarks
			C_L	L_v (m)	V5	V6	
Straight		8.23	0	0	160	160	1 st vane
		9.07	30	0.84	160	160	
Curved	1	9.91	30	0.84	160	160	
	11	10.60	30	0.84	160	160	
	21	11.29	30	0.84	160	160	
	31	12.23	30	0.84	160	160	
	41	12.72	30	0.84	160	160	
	51	13.48	30	0.84	160	160	
	59	14.04	25	0.70	165	160	
	66	14.51	20	0.56	165	160	
	71	14.90	15	0.42	170	160	Start of impingement
	76	15.23	15	0.42	170	160	
81	15.57	15	0.42	170	160		
86	15.95	15	0.42	175	160	Impingement center	
Straight		16.35	15	0.42	170	160	15 th vane

영향은 서로 차이가 없으나 그 발생 위치에 대한 영향은 다르다. 수중 수제의 입사각은 수면변동보다는 하상변동에 더 큰 영향을 미친다. 이는 예각 수제가 흐름을 만곡 내측으로 반사시키고 둔각 수제는 수제와 접안 벽 사이에 흐름을 가두는 분리효과를 반영하기 때문으로 생각된다. 만곡부에서 2차류는 하상과 수면 변동을 지배하는 핵심 요인이다. 수중 수제는 입사각에 따라 2차류를 변화시키는 정도가 다르기 때문인 것으로 판단된다. 수중 수제의 높이가 횡단면의 평균하상고보다 약간 높고 수제 상단이 평균수심의 약 85 % 수면 아래에 있기 때문에 수제는 수면보다 하상근처의 흐름구조 변화에 더 민감하게 작용하는 것으로 생각된다. 만곡부 하상변동을 제어하는 효과적인 수단으로써 비교적 두꺼운 수중 수제를 사용하기 위해서는 수제의 입사각을 주의하여 설치할 필요가 있다.

4.1.2 균일 둔각 수제 열

만곡부에 설치한 수제의 입사각이 둔각으로서 균일한 160°와 160~175°로 불균일할 때 하상에 미치는 영향을 조사하기 위해서 N2기준 하상에 대해 Table 4와 같이 수제를 배치하고 V5와 V6의 실험을 수행하였다. 여기서 수제 열 계수 C_{Li} 는 3이고, 불균일한 입사각의 분포는 수중부 중심에서 멀어짐에 따라 입사각을 줄이되 중심선거리 13.48 m부터 상류는 160°로 동일하게 설치하였다. Fig. 7은 수로 중앙선을 따라 최심하상고의 변화를 나타낸 것이다. 수로 중심선을 따라 11.2~14.5 m 구간에서 수제에 의한 국부세굴을 반영하여 규칙적인 파형의 하상변화를 나타낸다. 모든 수제의 입사각이 균일하면 수제에 의한 불균한 경우보다 국부세굴이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 만곡구간에서 입사각 분포가 균일하면 수중 수제가 하상부근의 2차류 흐름에 미치는 영향이 상대적으로 균일하게 작용하기 때문에 수제 개별의

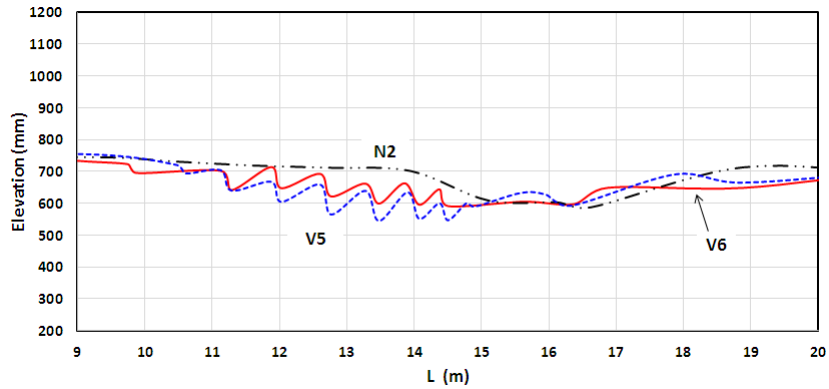


Fig. 7. Thalweg Profile (V5, V6)

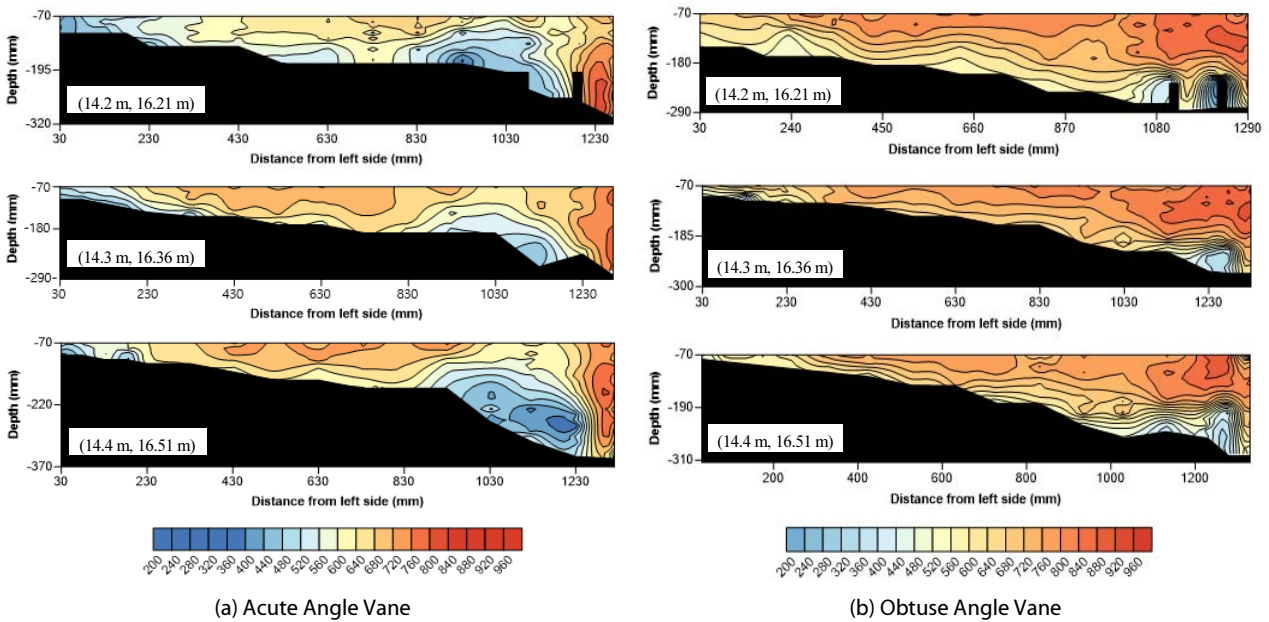


Fig. 8. Streamwise Velocity Contours in Cross-Sections ($Q=163 \text{ l/s}$ and Installed with V6)

세굴 감소로 나타난 것으로 판단된다. 그러나 편수위는 수제 설치에 따라 오히려 증가하였는데 입사각이 균일한 경우 약 63 %, 불균일한 경우 약 90 %나 증가하며 균일 둔각의 증가율이 작았다. 따라서 균일 둔각 수제가 불균일 둔각 수제에 비하여 최대 세굴삼과 최대 편수위가 적게 발생한다.

4.1.3 균일 예각과 둔각에서 횡단면 유속분포

입사각이 흐름에 미치는 영향을 판단하기 위하여 V6의 평면적인 수제 배치에 대해서 예각과 둔각의 횡단면 유속분포를 조사하였다. Fig. 8은 수제설치 단면(상류단에서 좌안 거리 14.2 m, 우안 거리 16.21 m)과 그 하류로 좌안 기준 0.1 m와 0.2 m 단면에 대해 수면에서 약 70 mm 아래의 유속분포를 나타낸다. 이때 유량은

163 l/s 이고 F_r 은 0.43이었다. Fig. 8에서 (a) 예각과 (b) 둔각의 유속분포를 비교하면 둔각으로 설치한 수제에서는 수제와 외측벽 사이의 수심방향 속도기울기가 예각에 비해 상대적으로 매우 큰 것으로 나타났다. 예각의 경우에는 만곡 외측벽 하상 부근에서 최대유속이 발생하고 수제의 좌측 하상부근에서 최저유속이 나타났지만, 둔각에서는 수제 상부 우안측 수면에서 최대유속이 나타나고 최저유속은 수제 주변의 수제높이 이하 공간에서 발생하였다. 수면부근의 유속은 둔각으로 설치한 수제가 예각 수제에 비하여 빠르나, 수제 상단 높이의 아래 구역에서 유속은 예각보다 둔각에서 더 느리다. 예각에서는 수제가 설치된 단면에서 하류로 갈수록 수로 중앙부의 유속이 증가하고, 수제 하류 0.1 m 단면에서 우안측 하상부근 유속이 매우 빠르게 줄어들지 않았다. 이는 예각 수제

우안 측의 하상 세굴이 강화될 수 있음을 의미한다. 그러나 둔각에서는 수제의 하류부 하상 근처에서 유속이 느려진 것을 알 수 있다. 결과적으로 수제의 설치 각도가 수제 주변의 수로방향 유속분포에 크게 작용하는 것을 의미한다. 뿐만 아니라 수제가 만곡부 흐름의 주요 특성인 2차류에도 큰 영향을 미치는 것을 Fig. 9에서 확인할 수 있다. 만곡부의 2차류는 일반적으로 수면부근에서는 만곡의 내측에서 외측을 향하고 하상부근에서는 외측에서 내측을 향한다. 수제를 예각이나 둔각으로 설치하더라도 이 같은 일반적 경향은 변화가 없으나 국부적으로 주목할 만한 변화가 있는 것을 Figs. 9(a), (b)에서 알 수 있다. 예각으로 설치한 수제는 2차류를 수제 좌우측으로 분할하고 있으나 둔각으로 설치한 수제는 수제 주변의 2차류를 크게 완화시키고 만곡 내측의 2차류까지 교란시키고 있다.

즉 예각에서는 수제가 2차류를 차단하는 효과는 발견되지 않고 오히려 우안측의 연직하향류를 강화시켜 세굴이 증가하는 것으로 판단되나, 둔각에서는 하상 부근 2차류가 차단되어 교란이 확산하고 우안측에서는 수제 하류까지도 지속되어 우안측에 하상퇴적을 유도하는 것으로 판단된다.

4.2 수제 열 간격의 영향

본 연구에서는 수로방향으로 수제를 2열로 배치하였는데 그 간격이 최심하상고 변화에 미치는 영향을 평가하기 위하여 C_{Li} 가 1.5와 3인 경우에 대하여 실험하였다. Fig. 10은 만곡부의 수제 주변 하상을 보여준다. Fig. 11은 수제 중심선을 따른 최심하상고 분포를 나타낸다. 입사각이 동일한 실험조건에서 C_{Li} 가 증가하면

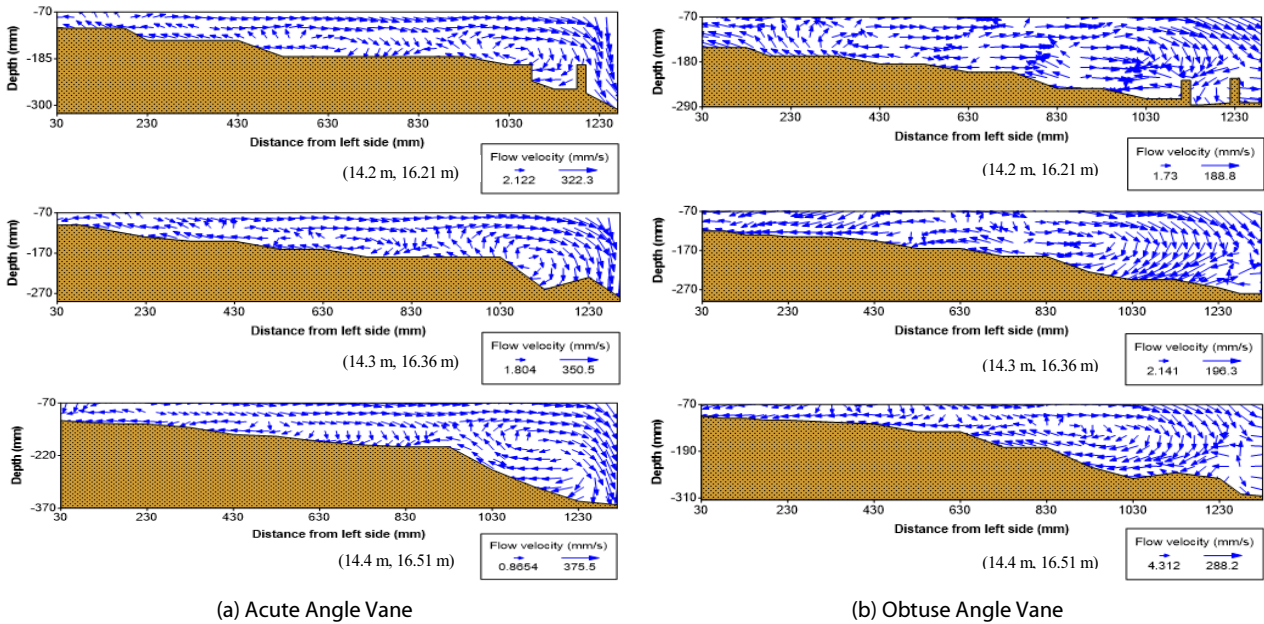


Fig. 9. Secondary Flow in Cross-Sections ($Q=163 \text{ l/s}$ and Installed with V6)



(a) V3



(b) V4

Fig. 10. Photos After Experiments (V3, V4)

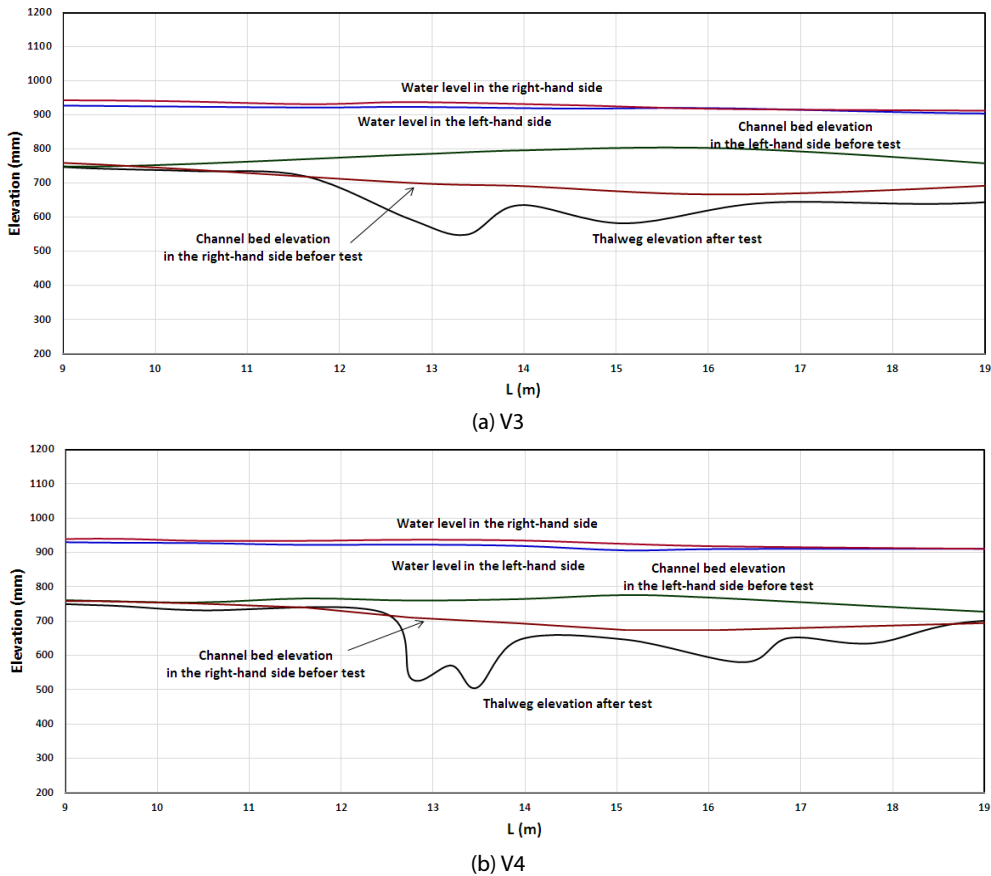


Fig. 11. Thalweg Profile (V3, V4)

만곡부 하상의 최대 세굴은 더 커지고 최심하상과 주변에 집중되는 것을 실험 V3과 V4의 비교로 알 수 있다. 여기서 세굴이 집중되는 현상은 수제 입사각을 예각에서 둔각으로 설치할 때와 유사하다. 그러나 균일 입사각을 고려하면 C_{Li} 가 3일 때 최대 세굴심은 오히려 크게 감소한다. 수제 열 간격 변화에 따른 최대편수위 변화율은 수제 열 계수 C_{Li} 가 1.5일 때 0.27 증가하는 것에 비하면 C_{Li} 가 3인 경우에는 0.63~0.9로 크게 증가하였다. 수제설치의 기준하상 N1은 N2에 비하여 유량이 많고 수심과 만곡부 세굴심이 크며 수제의 최대 상단 높이가 더 높다. 따라서 N1하상에 근거해 수제가 설치되었으나 유량은 N2와 유사한 V1과 V2 실험에서 최대 편수위는 수제 설치로 감소하는 데 반해서 N2하상을 기준으로 수제가 설치된 V3에서 V6의 실험에서는 최대 편수위가 증가한다. 이는 수제 상단의 높이와 실험유량이 작용한 결과이다. 따라서 최대 편수위는 수제의 최대 상단 높이, 유량, 수제 열 간격의 상호작용에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

4.3 수제설치 기준하상의 영향

수제설치에 필요한 기준하상을 결정하기 위한 N2 실험의 유량은

N1의 약 89.5 %이며 수제를 설치한 모든 실험의 평균유량과 같다. 수제설치 기준하상 N1과 N2은 수충부의 발생위치와 수제높이에 영향을 미치지 때문에 수제설치 후 실험유량이 유사하다는 것은 수제설치 기준하상의 상대적인 영향을 가늠할 수 있다는 것을 의미한다. N1을 기반으로 수제를 설치한 V1과 V2실험의 결과는 기준하상의 형성유량보다 작은 유량이 흐를 때($Q_r < 1$) 만곡부의 하상과 수위가 보여준 반응을 내포하고 있다. 이것은 실제하천에서 수제가 설계기준 홍수량보다 규모는 작지만 수많은 홍수를 경험할 때 수제가 만곡부의 하상에 미치는 영향을 판단하는 데 사용될 수 있을 것이다. N2에 근거하여 수제를 설치한 실험 V3에서 V6는 기준하상의 형성유량과 같은 유량이 흐를 경우($Q_r = 1$) 만곡부의 하상변동과 편수위를 보여준다. 실험 결과는 균일한 입사각을 제외하면 Q_r 이 1과 같거나 작아도 수제설치에 따른 만곡부의 최대 세굴심도의 증가는 크게 다르지 않았다. 그러나 최대 세굴심의 발생 위치는 서로 다른 것으로 나타났다. 즉, 만곡부에 설치한 수제는 Q_r 이 1이면 최대 세굴심의 위치가 하류로 이동하고, Q_r 이 1보다 크면 그 위치가 상류로 이동한다. Q_r 이 1이면 수제가 편수위를 감소시키거나 Q_r 이 1보다 크면 편수위를 증가시키고 있다. 이는

하상 형성유량이 흐름 때 2차류의 구조가 그 유량보다 작은 유량이 흐름 경우와 다르기 때문인 것으로 생각되며 이에 대한 구체적인 추가 연구가 필요하다.

5. 결론

수중 수제의 입사각은 만곡부의 횡방향 수면경사보다 유심선을 따라 발달한 하상고의 변화에 매우 큰 영향을 미친다. 최대 세굴심의 양상은 수제의 입사각을 예각 또는 둔각으로 설치하는가에 따라 큰 차이를 나타낸다. Q_c 이 1보다 작은 경우 예각일 때 최심하상고의 종단적 변화는 비교적 완만하나, 둔각에서는 세굴이 크고 집중되며 변화가 심하다. 편수위는 수제 설치로 약간 감소하나 예각과 둔각에 따른 편수위 크기의 차이는 없다. 최대 편수위의 위치가 예각에서는 하류로 이동하나 둔각일 때는 상류로 이동한다. 수중 수제의 입사각은 수제 주변 국부세굴의 영향과 더불어 편수위보다는 최심하상고 변동에 더 큰 영향을 미친다. 이는 예각 수제는 흐름을 대안 측으로 반사시키고 둔각 수제는 수제와 접안 사이에 흐름을 가두는 분리효과를 반영하며, 수제 상단이 평균수심의 약 0.85 깊이에 위치하므로 수중 수제는 수면보다 하상근처의 2차류 흐름구조 변화에 더 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. Q_c 이 1일 때 수제 설치는 만곡부의 최대 세굴심과 편수위를 증가시키지만 입사각이 균일하면 최대세굴심의 변화는 작다. 둔각으로 설치한 수제 단면 근처 수면부근에서 유속은 빠르나 수제 높이 이하에서 유속은 느리다. 예각에서는 최대 유속이 만곡부 내측 제방쪽으로 이동한다. 예각 수제의 직 하류 단면에서는 만곡 외측 유속이 매우 빠르기 때문에 수제의 외측 제방쪽으로 하상세굴이 강화되고, 둔각에서는 수제의 직 하류부 하상 근처 우안으로 유속이 느려져 우안 측에 하상이 퇴적된다. 입사각이 동일한 조건에서 수제 열 간격이 증가하면, 만곡부 하상의 최대 세굴은 더 증가하고 최심하상고 주변에 집중되며, 균일 입사각인 경우에는 최대 세굴심이 오히려 크게 감소한다. 향후 수제 설치의 입사각 변화와 최대 높이 및 하상형성유량과 실험유량 등 다양한 조건에 따른 만곡부 하상과 수위의 반응에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(18RDRP-B134571)에 의하여 수행되었으며, 한국연구재단의 일부 지원(NRF-2015R1A2A2A01007100)이 있었습니다.

본 논문은 2018 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

- Johnson, P. A., Hey, R. D., Tessier, M. and Rosgen, D. L. (2001). "Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments." *Journal Hydraul. Eng.*, Vol. 127, No. 9, pp. 772-778.
- Kang, J. G., Yeo, H. K. and Kim, S. J. (2005). "An experimental study on tip velocity and downstream recirculation zone of single groyne conditions." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 2, pp. 143-153 (in Korean).
- Kim, S. J., Kang, J. G. and Yeo, H. K. (2014). "An experimental study on flow characteristics for optimal spacing suggestion of 45°upward groynes." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 5, pp. 459-468 (in Korean).
- Korea Water Resource Association (KWRA) (2009). *Guideline for river design and explanation*, pp. 347-379 (in Korean).
- Lee, J., Jeon, J., Kim, Y. and Kang, S. (2018). "Flume experiments for studying the effects of submergence on three-dimensional flow structure around a spur dike." *Journal Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 51, No. 2, pp. 109-120 (in Korean).
- Odgaard, A. J. and Mosconi, C. E. (1987). "Streambank protection by submerged vanes." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 113, No. 4, pp. 520-536.
- Odgaard, A. J. and Kennedy, J. F. (1983). "River-bend bank protection by submerged vanes." *Journal Hydraul. Eng.*, Vol. 109, No. 4, pp. 1161-1173.
- Odgaard, A. J. and Wang, Y. (1991a). "Sediment management with submerged vanes. I: Theory." *Journal Hydraul. Eng.*, Vol. 117, No. 3, pp. 267-283.
- Odgaard, A. J. and Wang, Y. (1991b). "Sediment management with submerged vanes. II: Applications." *Journal Hydraul. Eng.*, Vol. 117, No. 3, pp. 284-302.
- Ouyang, H. T., Lai, J. S., Yu, H. and Lu, C. H. (2008). "Interaction between submerged vanes for sediment management." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 46, No. 5, pp. 620-627.
- Shin, S. S., Park, S. D., Lee, S. K. and Ji, M. G. (2012). "Estimating critical stream power by the distribution of gravel-bed materials in the meandering river." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 2, pp. 151-163 (in Korean).
- Wang, Y. (1991). *Sediment control with submerged vanes.*, Ph.D. thesis. University of Iowa, Iowa.
- Wohl, E. (2000). *Mountain rivers*, Water Resources Monograph 14, AGU, pp. 1-3.
- Yang, J. J., Park, S. D., Shin, S. S. and Woo, T. Y. (2014). "Characteristics of bed material shape of gravel bed rivers in Youngdong area." *Journal of Geomorphological Association of Korea*, Vol. 45, No. 2, pp. 151-163 (in Korean).
- Yeo, H. K., Roh, Y. S., Kang, J. G. and Kim, S. J. (2006). "Variations of flow thalweg alignment and separation region around a groyne." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 4, pp. 313-320 (in Korean).