

침수식생 개수로에서 난류 및 부유사 이동 특성

Characteristics of Turbulent Flows and Suspended Sediment Transport in Open-channel with Submerged Vegetation

양 원 준* / 장 지 연** / 최 성 욱***

Yang, Wonjun / Jang, Jiyeon / Choi, Sung-Uk

Abstract

The open-channel flow with submerged vegetation shows distinct features in two separate regions, namely upper and vegetation layers. In the upper layer, the flow is akin to the open-channel flow, while the flow in the vegetation layer is relatively uniform with suppressed turbulence due to vegetation stems. This paper presents laboratory experiments to investigate the characteristics of turbulent flows and suspended sediment transport in open-channel flows with submerged vegetation. An open-channel facility, 0.5 m wide and 12 m long, was used for laboratory experiments. Various discharges were employed with depth ratios of 2~3, and wooden cylinders were used for vegetation. To make equilibrium suspension, sediment particles of median diameter of 75 μm were fed until capacity condition. Laser Doppler velocimeter was used to measure instantaneous velocity, and direct sampling with vinyl tube was used to measure the concentration of suspended sediment. Using the sampled data, the mean flow and turbulence structures were provided and characteristics of suspended sediment concentration with Rouse number were presented.

Keywords : open-channel, turbulence, suspended sediment, submerged vegetation, hydraulic experiments

요 지

침수식생 개수로 흐름은 구조적으로 상부영역과 식생영역으로 구분되는데, 상부영역은 일반 개수로의 흐름특성을 보이며 식생영역은 줄기에 의해 난류가 억제되어 정수식생 조건의 흐름과 유사하게 단순한 흐름특성을 보인다. 본 논문은 침수식생 개수로 흐름의 난류 및 유사이동 특성에 관한 실험연구이다. 이를 위해 폭 0.5m, 길이 12m인 개수로 실험장치를 이용하여 수리실험을 실시하였다. 다양한 유량에 대하여 수심비 2~3인 흐름을 구현하였고, 나무 원형 실린더를 이용하여 식생을 재현하였다. 평형상태에서 부유사 농도 분포를 측정하기 위해서 중앙입경이 75 μm 인 모래를 한계조건에 도달하기 까지 지속적으로 투입하였다. 유속 성분의 계측을 위하여 레이저 도플러 유속계를 사용하였고, 튜브를 이용한 사이포닝 방식으로 시료를 직접 채취하여 부유사 농도를 측정하였다. 측정된 자료를 이용하여 실험조건에 따른 평균흐름과 난류량의 특성을 살펴보고, Rouse 수에 따른 부유사 농도 분포를 제시하였다.

핵심용어 : 개수로, 난류, 부유사, 침수식생, 수리실험

* (주)한국전력기술 토목건축기술그룹 대리 (e-mail: pulip1@gmail.com)

** 교신저자, 연세대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정 (e-mail: jiyeon83@yonsei.ac.kr)

Corresponding Author, Graduate Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Yonsei University, 134 Shinchon-dong, Seodaemun-gu, Seoul, Korea.

*** 연세대학교 토목환경공학과 교수 (e-mail: schoi@yonsei.ac.kr)

1. 서론

일반적으로 하도 내 식생은 유속 구조의 변화를 통해 침식률을 줄이며, 뿌리로 인한 토양의 응집력을 증가시키고, 잎에 의한 차단과 증발산에 의해 수분 함량을 줄인다. 이와 같은 세 가지 특성은 제방의 안전에 도움이 되기도 한다. 또한, 하도 내 식생은 유사를 포집하며, 수생동물에게 서식처를 제공한다. 저서무척추동물에게 먹이를 공급하기도 하고, 하천의 경관기능을 향상시킨다.

한편, 하도 내 식생은 홍수기에 수위를 증가시킨다. 관목류 혹은 목본류의 유송잡물이 하천을 횡단하는 교량에 집적되는 경우 횡압력이 증가하여 교량의 붕괴를 유도할 수 있다. 또한, 제체에 활착한 식생은 파이프 작용으로 제체의 침투능을 증가시키고, 식생군 주위로 국부세굴이 발생하며, 제체 자중을 증가시킨다. 마지막 세 가지 항목은 제방의 안전에 직접적으로 부정적인 영향을 미칠 수 있다 (Simon et al., 2004).

기존의 하천수리학은 유동, 유사이동, 하천형태, 수리시설물 등의 비생물적인 상호작용만을 다루어 왔는데, 최근에 주목받고 있는 생태수리학은 대상에 수생 혹은 하변 생태계와 여기에 서식하고 있는 동식물을 포함한다. 따라서, 식생은 새롭게 정의되는 생태수리학의 범주에서 중요한 역할을 하는 요소가 된다 (Tsujiimoto, 1999; Woo, 2010).

이러한 의미에서 하천에서 흐름-유사이동-식생은 서로 긴밀하게 작용하며 이들 상호작용에 관한 연구는 생태수리학 분야에서 중요한 과제이다. 유량 및 난류량에 의해 유사량이 결정되고, 유사이동에 의해 형성된 하도에 흐름이 형성된다. 하도에 식생의 활착/번성이 흐름조건에 의해 좌우되며, 하도 내 식생은 저항을 제공하여 흐름을

제어한다. 또한, 유사의 퇴적 및 침식이 하도 내 식생의 활착에 중요하며, 식생은 평균 흐름 및 난류 구조의 변화를 통해 유사이동에 영향을 미친다.

하도 내 식생이 존재할 때 식생 흐름 (vegetated flow) 은 전체수심 (H)과 식생높이 (h_1)의 상대적인 크기, 즉 수심비 (H/h_1)에 따라 세 가지로 분류할 수 있다 (Fig. 1). 수심비가 5~10보다 큰 경우, 식생피복흐름 (terrestrial canopy flow)이라고 하며 일반 개수로 흐름과 비슷한 평균흐름 및 난류구조를 보인다. 수심비가 1보다 작은 경우에는 정수식생 흐름으로 전 수심에 걸쳐 평균흐름이 약하고 난류가 억제된 양상을 보인다. 이 두 흐름의 중간 형식이 침수식생 흐름이다. 흐름 특성이 상이한 층으로 구분되는데, 식생층 (vegetation layer)은 정수식생 흐름의 구조를 보이고 상층부 (upper layer)는 일반 개수로의 흐름구조를 보인다.

기존 식생흐름에서 평균흐름, 난류 및 조직구조 (coherent structure)에 관한 연구는 비교적 많이 수행되었다. 실험 연구로는 Tsujimoto et al. (1991), Nepf and Vivoni (1999, 2000) 등을 들 수 있으며, 수치모의를 통한 연구는 Lopez and Garcia (2001), Choi and Kang (2004, 2006) 등이 있다. 한편, 식생 흐름에서 유사이동에 관한 연구는 극히 제한적으로 수행되었다. 관련 연구로, Tollner et al. (1977)은 실험을 통해 등류상태에서 정수조건 식생을 통과할 때 유사의 퇴적 현상에 대해 연구하였다. 이후 Tollner et al. (1982)은 정수식생 조건에서 흐름강도에 따른 부유사량을 제시하였다. Jordanova and James (2003)는 수리실험을 통하여 정수식생 조건 개수로 흐름에서 흐름저항을 줄기항력과 하상전단응력으로 구분하였을 때 부유사량은 하상전단응력에 지배받음을 보였다.

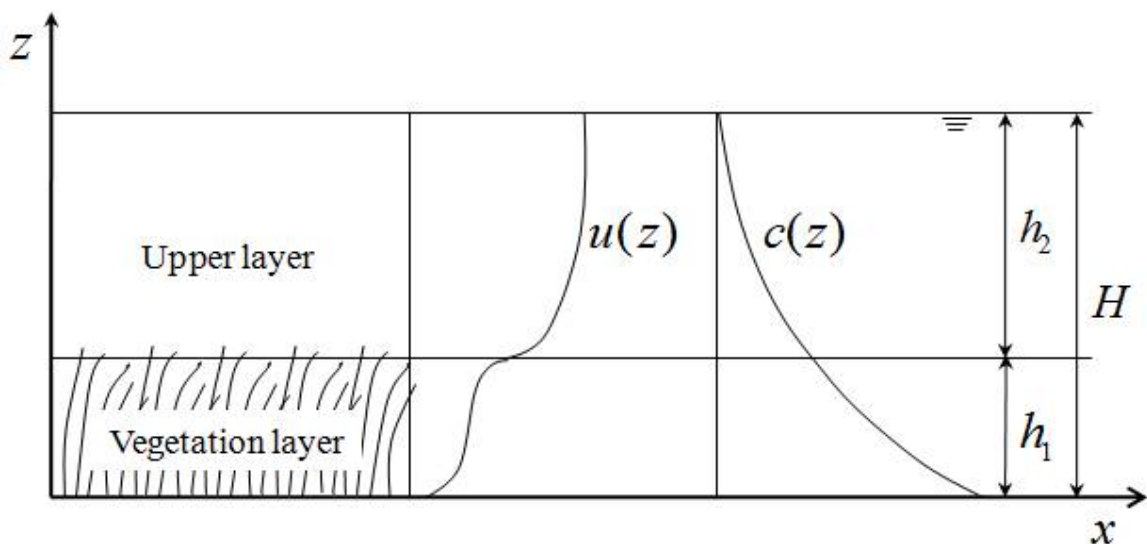


Fig. 1. Schematic Sketch of Velocity and Suspended Sediment Concentration in Open-Channel Flow with Submerged Vegetation

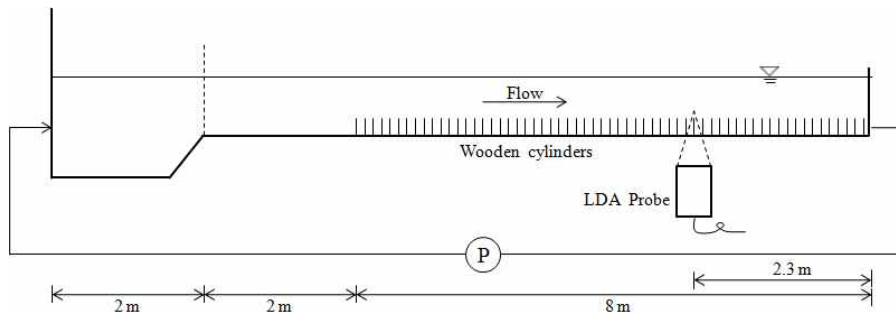
본 연구는 흐름-유사이동-식생의 상호작용에 관한 연구이다. 연구목적은 수리실험을 통해 침수식생 조건의 개수로에서 유사흐름의 평균흐름, 난류량, 그리고 부유사 분포 특성을 조사하는 것이다. 폭이 0.5m 길이 12m인 개수로 실험장치의 바닥에 나무 원형실린더를 일정 밀도로 부착하여 레이놀즈수 27,000~60,000 범위의 흐름을 발생시켰고, 평균유속 및 난류량을 제시하였다. 또한, 중앙입경이 75 μm 인 모래를 투입, 직접취수법으로 부유사농도를 측정하여 농도분포를 제시하였다.

2. 수리실험

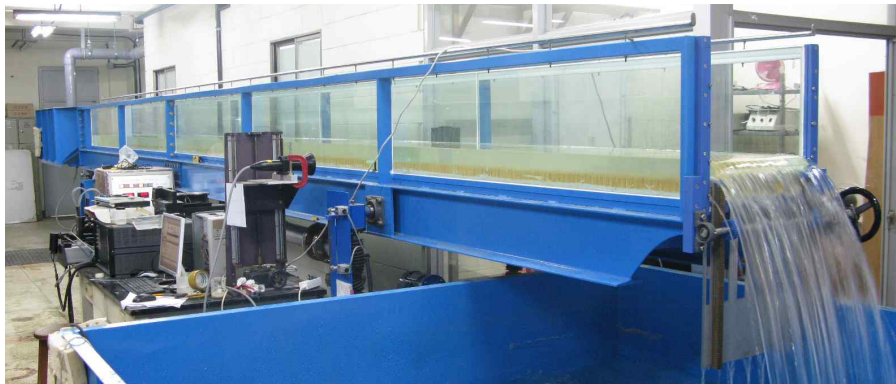
침수식생 개수로에서 평균흐름, 난류구조, 그리고 부유사 농도분포 특성을 조사하기 위하여 수리실험을 실시하였다. 본 연구에서 적용한 수리실험 조건은 Table 1과 같다. 실험에 사용된 흐름은 Reynolds 수의 범위가 27,000~60,000이며, Froude 수의 범위는 0.21~0.46이다. 실험 Exp.#11S와 Exp.#12에서 구현된 수심비는 2.0이며, 이외의 경우는 3.0이다. 부유사의 투입 여부에 따른 평균흐름 및 난

Table 1. Experimental Conditions

Case	q (m^2/s)	H (m)	S (-)	h_1 (m)	a (m^{-1})	Suspended Sediment	cb	Re	Fr
Exp#7S	0.043	0.12	0.002	0.04	3	O	0.0028	43,000	0.33
Exp#8	0.043	0.12	0.002	0.04	3	X		43,000	0.33
Exp#11S	0.029	0.08	0.009	0.04	3	O		29,000	0.41
Exp#12	0.029	0.08	0.009	0.04	3	X		29,000	0.41
Exp#15	0.060	0.12	0.005	0.04	3	X		60,000	0.46
Exp#16S	0.060	0.12	0.005	0.04	3	O	0.0021	60,000	0.46
Exp#17	0.027	0.12	0.002	0.04	3	X		27,000	0.21
Exp#18S	0.027	0.12	0.002	0.04	3	O	0.0012	27,000	0.21



(a) A schematic sketch



(b) A photograph taken during experiment

Fig. 2. Open-Channel Facility

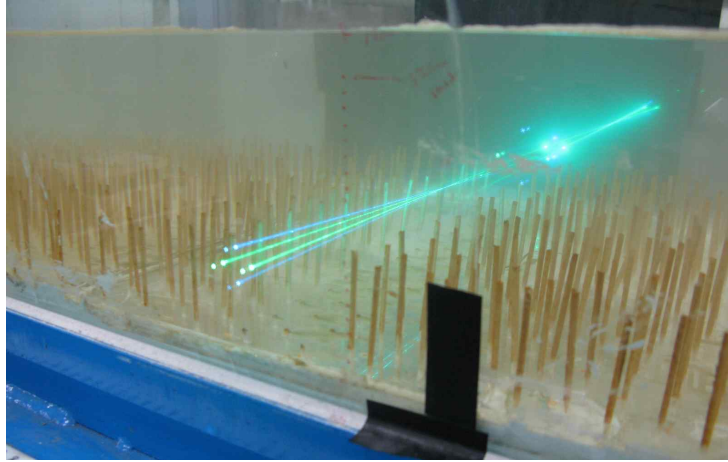


Fig. 3. Photograph Taken During Velocity Measurements

류량의 변화를 살펴보기 위해 동일한 흐름조건에서 부유사 유무에 따라 두 가지 실험을 실시하였다.

본 실험에서 사용한 가변경사식 개수로의 개요도와 사진을 Fig. 2(a)와 (b)에 각각 제시하였다. 개수로의 제원은 폭 0.5 m, 길이 12 m이며, 부유사 실험의 편의를 위해 재순환 방식의 수로를 이용하였다. 펌프의 유입유량은 펌프의 회전수를 통하여 제어하였으며, 본 실험 실시 이전 예비실험을 실시하여 유량을 계측하였다. 또한, 수리실험 시 하류단 위로부터 1 m 간격으로 수심을 측정하여 등류상태를 확인하였다.

유속 측정은 수로 끝단으로부터 2.3 m 떨어진 지점 및 수로 중앙에서 레이저 도플러 유속계 (Laser Doppler Anemometer: LDA)를 이용하여 이루어졌으며, 부유사 농도 측정 또한 동일한 지점에서 수행되었다. 유속 측정 시 주변 3개 지점에 대하여 유속을 측정 후 측정값을 앙상블 평균 (ensemble averaging)하여 식생으로 인한 유속장의 불균질성 (inhomogeneity)을 제거하였다.

유속의 경우 바닥 및 수면의 영향을 피하기 위하여 수심비가 3인 흐름 (Exp. #7S, 8, 15, 16S, 17, 18S)은 수직방향으로 0.5 cm 간격으로 20지점을 측정하였으며, 수심비가 2인 흐름 (Exp. #11S, 12)은 0.5 cm 간격으로 12개 지점을 측정하였다. 농도의 경우 수심비가 3인 흐름은 바닥에서 1 cm 위부터 1 cm 간격으로 12지점을 측정하였고, 수심비가 2인 흐름은 동일한 방법으로 1 cm 간격으로 8개 지점을 측정하였다.

LDA는 ADV 및 열선 유속계와 비교하여 흐름을 교란시키지 않는 장점이 있으며, 측정부피가 작아 수심이 얇아도 적용 가능하며 수면 근처나 흐름 내부의 구조물 주위에도 유동을 측정할 수 있다. 좌표축은 주흐름방향, 횡방향 그리고 하상의 수직방향을 각각 x , y , z 축으로 설정하였다. 측정된 자료의 신뢰성을 확인하기 위해서 LDA는

한 지점 당 100초씩 측정하여 약 10,000개의 자료 (측정속도 약 100 Hz)를 획득하였다.

수리실험에는 직경 0.002 m, 길이 0.04 m인 나무 원형 실린더를 이용하여 모형식생을 구현하였다 (Fig. 3). 실험 수로에 식재된 식생의 식재 밀도 (a)는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$a = ND_v = \frac{D_v}{l_x \cdot l_y} \quad (1)$$

여기서, N 은 단위 면적당 식생 수, D_v 는 식생 직경, l_x 와 l_y 는 흐름방향 및 횡방향 식재간격이다. 실제 하천에서의 식생밀도는 서식조건 및 계절, 그리고 식생 종류에 따라 다양한 분포를 보이게 된다. 기존 실험 연구에 적용된 식생밀도를 감안하여 단위면적당 약 14,000개의 식생을 식재하여 식생밀도가 3.0 m^{-1} 이 되도록 하였다.

일반적으로 개수로 흐름에 의한 부유사의 평형상태를 만들기 위하여 상류단에서 일정량의 부유사를 지속적으로 투입하고, 하류단에 sediment trap을 만들어 수거하는 방식을 사용하지만, 이는 실험에 필요한 부유사의 총량 측정 및 실험의 난이도를 어렵게 한다. 따라서 본 연구에서는 저수조에 일정량의 부유사를 투입한 후 계속해서 순환시키는 방법 (recirculating type)을 사용하였다. 먼저 부유사를 투입하지 않은 상태에서 수리실험을 실시한 후, 유사의 양을 점차적으로 늘려가면서 수로바닥에 유사의 퇴적이 발생하는 한계조건 (capacity condition)까지 유사를 투입하여 유속 성분 및 농도를 측정하였다 (Cellino and Graf, 1999). 수로의 물을 충분한 시간동안 (약 2시간) 순환시킨 후 부유사 농도를 측정함으로써, 전체 흐름에서 부유사 농도가 균일하게 되도록 하였다. 수리실험에 사용한 부유사는 수중단위중량이 1.65이고, 중앙입경 $D_{50} = 75 \mu\text{m}$ 의 비교적 균일한 일반 모래를 사용하였다. Dietrich (1982)

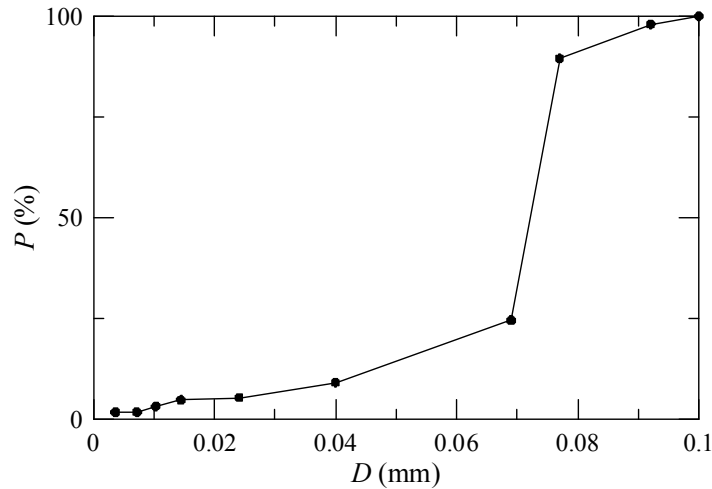
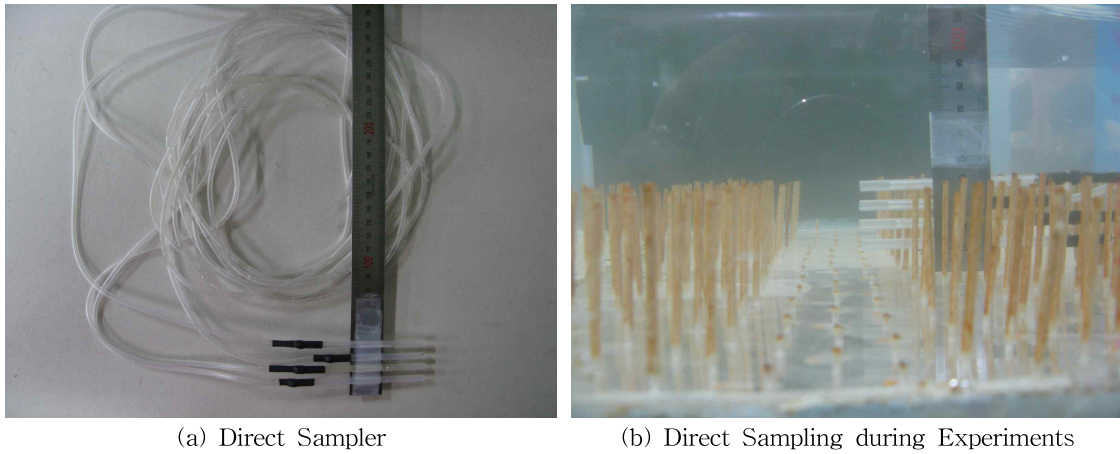


Fig. 4. Size Distribution of Suspended Sediment Particles



(a) Direct Sampler

(b) Direct Sampling during Experiments

Fig. 5. Direct Sampling of Water-Suspended Sediment Mixture

공식에 의한 유사입자의 최종침강속도는 0.0046 m/s이다. Fig. 4에는 실험에 사용된 모래의 입도분포를 도시하였다.

본 연구에서는 직접취수법을 이용하여 부유사 농도를 측정하였다. 직접취수법은 흐름 내부에 취수장치를 투입하여, 부유사가 혼합되어 있는 유수를 취수한 후, 이를 분석하여 부유사 농도를 산정하는 방법이다. 농도 측정을 위하여 Fig. 5와 같은 직접 취수장치를 제작하였다. 취수 장치는 직경 0.004 m인 원형 플라스틱 파이프와 바닥으로부터의 거리를 확인하기 위한 스테인레스 스틸 판으로 구성되어 있다. 플라스틱 파이프는 직경 0.002 m의 원형 플라스틱 관을 통하여 유수로부터 직접 취수 한 후, 연결된 플라스틱 파이프에 의해 비이커로 운반된다. 약 100 ml 이상 충분한 양을 취수하여 부유사 농도를 산정하였다. 일반적으로 직접취수법에 의한 부유사 농도 측정절차는 다음과 같다. 취수된 물의 무게를 측정 한 후, 이를 여과지 (pore size 40 μ m)에 여과시킨다. 건조기를 이용하여 여과지를 건조시키고, 정밀저울을 이용하여 건조된 여과지의

무게를 측정한다. 이를 이용하여 부유사의 무게를 계산한 후, 취수된 물의 무게를 가지고 부유사 농도를 산정한다.

3. 침수식생 개수로 흐름의 수리특성

3.1 평균흐름 및 난류구조

침수식생 조건의 개수로 흐름에서 평균흐름을 예측하는 모형으로 Yang and Choi (2010)가 제시한 2층모형과 Huai et al. (2009)이 제시한 3층모형이 있다. 본 연구에서는 식생층에서의 유속변화를 고려할 수 있는 3층모형을 적용하였다. 정상상태 등류 조건하에 침수식생 개수로 흐름의 운동량방정식은 다음과 같다 (Huai et al., 2009).

$$\frac{\partial \tau(z)}{\partial z} + \rho g S - \frac{1}{2} \rho C_D m D_v u^2(z) = 0 \quad (2)$$

여기서, τ 는 전단응력, C_D 는 식생에 의한 항력계수, 그리

고 m 은 식생 1주당 점유면적 ($= 1/(l_x \times l_y)$) 이다. Huai et al.은 식생층을 Prandtl의 혼합거리가설을 적용할 수 있는 내부 식생영역 (inner vegetation layer)과 유체점성의 영향을 무시할 수 있는 외부 식생영역 (outer vegetation layer)으로 나누어 고려하였다. 이와 같이 구분하면 모형에 바닥면에서의 비활조건을 적용할 수 있게 된다. 즉, 혼합거리 가설을 적용하면 내부 식생영역에서 전단응력의 분포는 다음과 같다.

$$\tau = \rho l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3)$$

여기서, l_m 은 혼합거리를 나타내며 개수로 흐름에서는 조도높이로 대체될 수 있다 (Huai et al., 2009). 한편, 외부 식생영역에서 전단응력을 다음과 같이 지수형태의 분포로 가정할 수 있다.

$$\tau = \tau_i \exp[\alpha(z - h_1)] \quad (4)$$

여기서, τ_i 는 외부 식생영역과 상부영역의 경계 (혹은 식생높이)에서 전단응력을 의미하고 α 는 식생영역에서 레이놀즈응력 분포의 모양에 따라 결정되는 상수이다. Huai et al. (2009)은 자신들의 수리실험 자료에 근거하여 $\alpha = 20.0$ 을 제시하였다. Eq. (4)에서 층간 전단응력 τ_i 는 다음 식으로 주어진다.

$$\tau_i = -\rho \overline{u'w'} \Big|_{z=h_1} \approx \rho g h_2 S \quad (5)$$

위의 Eq. (4)를 Eq. (2)에 대입하면 다음과 같이 외부 식생영역에서의 유속분포를 얻을 수 있다.

$$u = \sqrt{\frac{2gS[\alpha h_2 \exp\{\alpha(z - h_1)\} + 1]}{C_D m D_v}} \quad (6)$$

상부 영역에 대해서는 Eq. (2)에서 항력항이 제외되며, Righetti and Armanini (2002)이 제시한 혼합거리를 이용하면 다음과 같은 유속분포를 유도할 수 있다.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[1 + \frac{\kappa(z - h_1)}{l_0} \right] + \sqrt{\frac{2(\alpha h_2 + 1)}{C_D m D_v h_2}} \quad (7)$$

여기서, l_0 는 식생높이에서의 혼합거리를 나타낸다.

3.2 부유사 농도분포

정상상태 등류 조건 하의 평형상태에서 부유사 농도 분포에 관한 지배방정식은 다음과 같다.

$$-v_s \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{tz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (8)$$

여기서, c 는 시간적분된 부유사 농도, v_s 는 입자의 최종침

강속도, D_{tz} 는 z -방향으로 입자의 난류 확산계수를 나타낸다. 위의 식을 적분하면

$$v_s c + D_{tz} \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

여기서, Eq. (9)의 좌변은 유사의 이송 및 확산에 의한 흐름률을 의미하는데, 수면에서의 순흐름률 (net flux)은 영이므로 Eq. (9)의 우변은 영이 된다. 위의 식을 적분하기 위해서는 와-확산계수가 필요하며, 와-점성계수 (ν_t)와 와-확산계수 (D_t)의 비로 정의되는 Prandtl-Schmidt 수 ($\sigma_t = \nu_t/D_t$)를 이용하면 와-점성계수를 와-확산계수로 대체하여 위의 식을 적분할 수 있다.

침수식생 개수로 흐름에서 부유사 농도 분포를 구하기 위하여 Yang and Choi (2009)는 각각 상부영역 및 식생영역에서 다음과 같은 와-점성계수를 제안하였다.

$$\nu_t = z \frac{u_* \kappa}{C_u} \left(\frac{H - z}{h_2} \right) \quad (10a)$$

$$\nu_t = z \frac{u_* \kappa}{C_u} \quad (10b)$$

만약 Prandtl-Schmidt 수를 1이라고 가정하면, $D_{tz} = \nu_t$ 가 되고, Eq. (9)를 적분하여 다음과 같이 상층부 및 식생층에서의 농도분포식을 얻는다.

$$\frac{c}{c_b} = \left(\frac{z_b}{z} \right)^Z \left(\frac{H - z}{z} \frac{h_1}{h_2} \right)^{Z'} \quad (11a)$$

$$\frac{c}{c_b} = \left(\frac{z_b}{z} \right)^Z \quad (11b)$$

여기서, Z 는 Rouse 수이며 $Z' (= Zh_2/H)$ 은 새롭게 정의되는 매개변수이다.

4. 실험결과

Figs. 6(a)-(d)는 침수식생 개수로 흐름의 평균유속 분포를 나타낸다. 전반적으로 식생영역과 상부영역에서 유속차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 상부영역에서 흐름은 가속되고 대수분포의 형태를 보이며, 식생영역에서는 흐름은 감속되고 식생높이 부근에서 변곡점이 발생한다. 비교를 위하여 Huai et al. (2009)의 3층 모형에 의한 유속분포를 함께 도시하였다. 3층모형에 의한 유속은 상부영역과 식생영역 모두 흐름 특성을 대체적으로 잘 모의하지만 정확하지는 않은 것으로 나타났다. 즉, 3층모형은 식생영역에서 실험결과보다 균일하게 유속분포를 예측하며, 이에 따른 오차가 상부영역으로

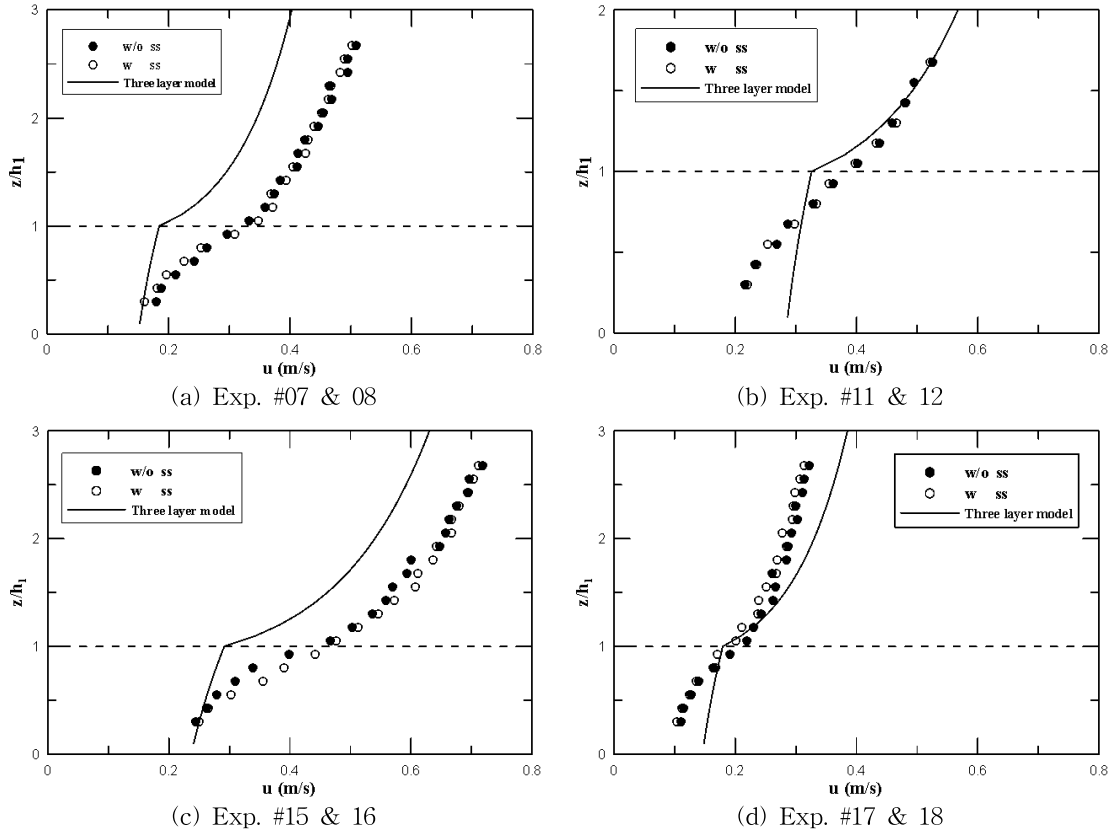


Fig. 6. Distribution of Mean Velocity

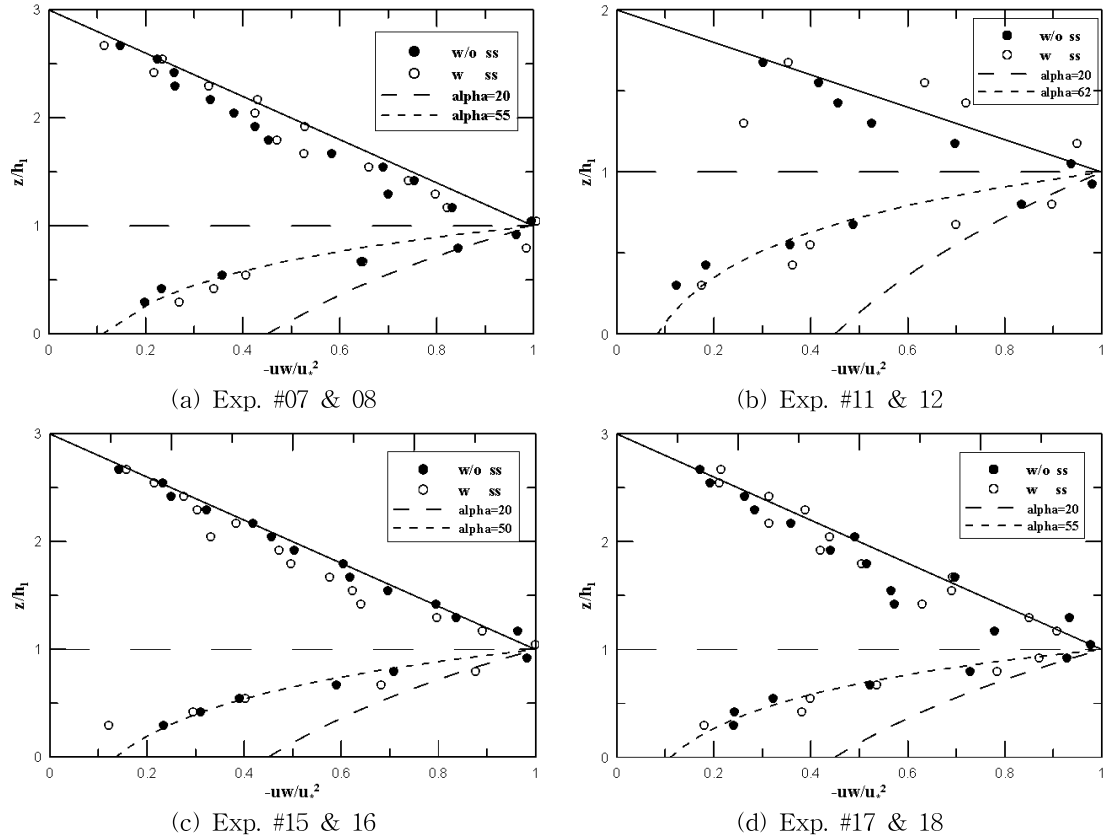


Fig. 7. Distribution of Reynolds Stress

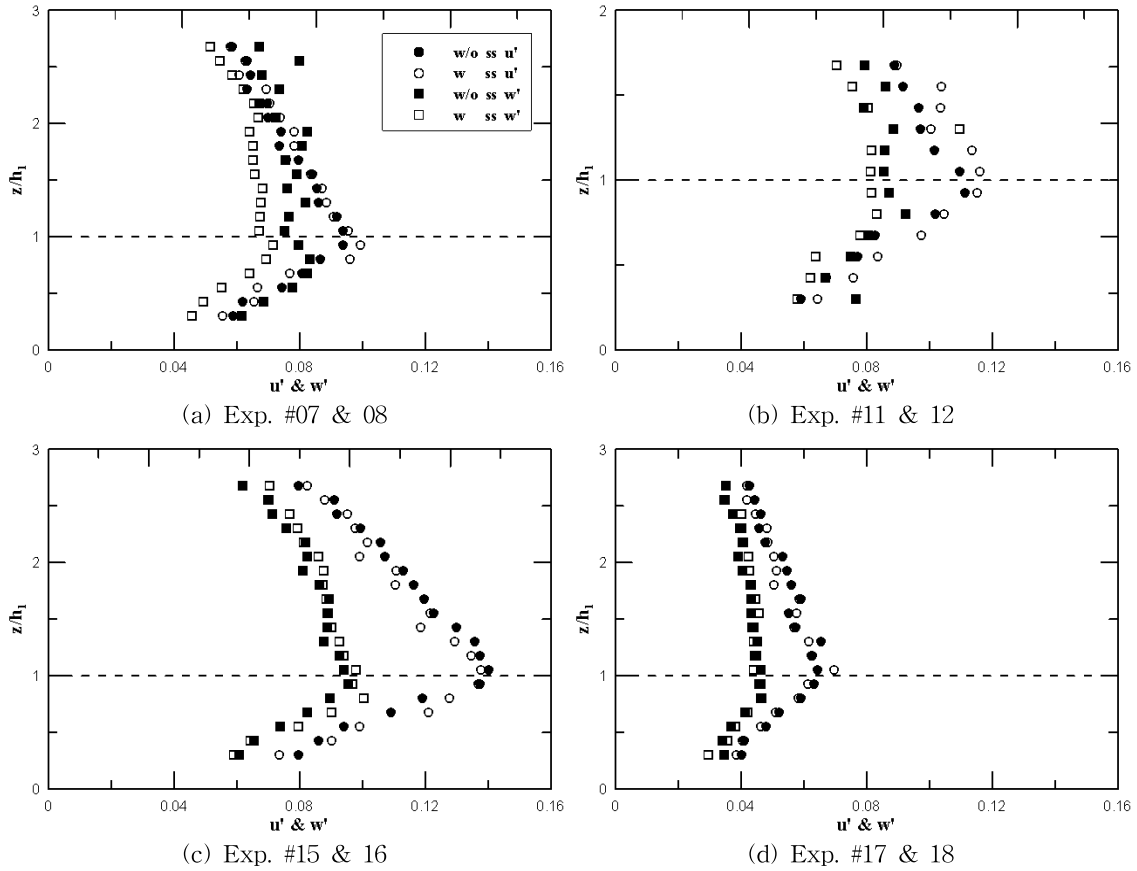


Fig. 8. Distribution of Turbulent Intensity

전과됨을 알 수 있다. 부유사의 포함에 따른 유속에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 동일 흐름조건의 유속분포를 함께 도시하였다. 체적농도 0.0003~0.001 범위에서 부유사가 평균유속에 미치는 영향은 거의 무시할 수 있음을 알 수 있다.

동일한 실험조건 하에 측정된 레이놀즈응력을 Figs. 7(a)-(d)에 도시하였다. 그림에서 레이놀즈응력은 수면에서 증가하여 식생높이 부근에서 최대값을 보이며 바닥으로 갈수록 감소하는 양상을 보인다. 레이놀즈응력은 상부 영역에서 선형함수로, 식생영역에서는 대수함수로 잘 근사됨을 알 수 있다. 특히, 식생영역에서 Huai et al. (2009)이 제시한 $\alpha=20.0$ 에 의한 레이놀즈응력 분포를 제시하였는데 과다 추정하는 것으로 나타났으며, 본 실험 결과에 따르면 $50 < \alpha < 62$ 일 때 Eq. (4)가 식생영역에서의 레이놀즈응력을 잘 예측하는 것으로 확인되었다. 평균 유속과 마찬가지로 부유사 포함에 따른 레이놀즈응력의 변화는 관찰되지 않았다.

Figs. 8(a)-(d)에 흐름방향 및 수직방향의 난류강도를 도시하였다. 그림에서 난류강도는 식생높이 부근에서 최대를 보이고 수면과 바닥으로 갈수록 감소하는 것을 확인할 수 있다. Nepf and Vivoni (2000)의 실험결과에 의

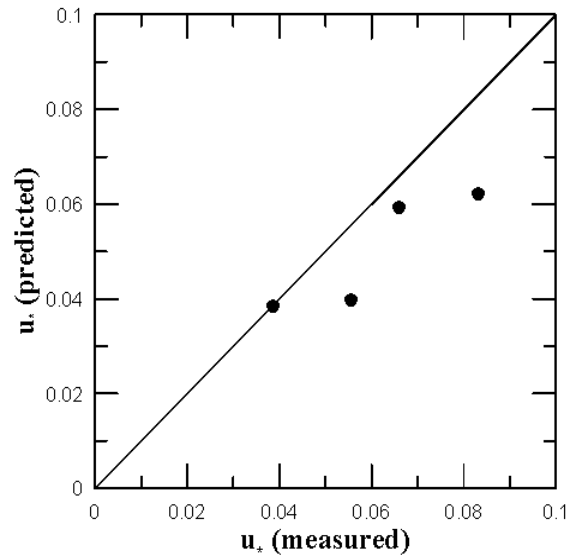


Fig. 9. Comparison of Predicted and Measured Shear Velocities at the Interface

하면 수직방향 난류강도가 흐름방향의 약 50% 정도라고 보고하였는데, 본 실험 결과도 이와 유사한 것으로 나타났다. 평균 유속 및 레이놀즈응력과 동일하게 부유사 투입여부가 난류강도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나

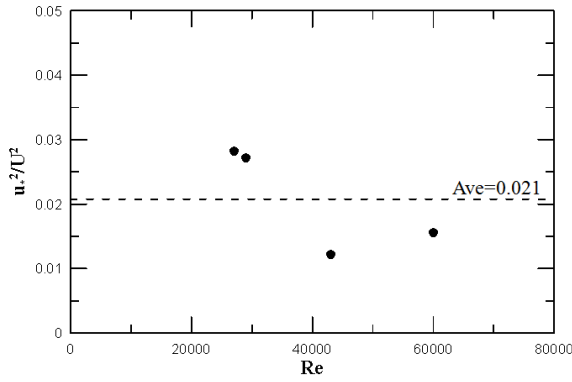


Fig. 10. Flow Resistance Coefficient with Reynolds Number

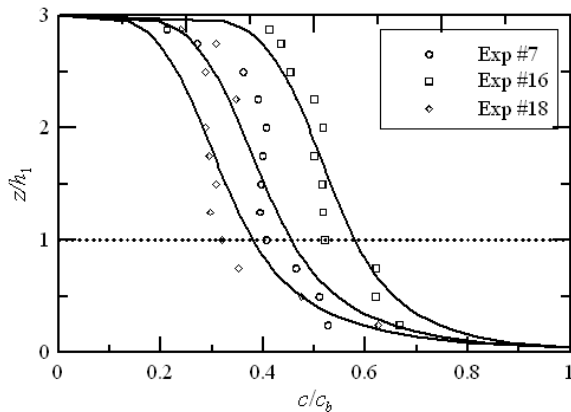


Fig. 11. Distribution of Suspended Sediment Concentration

타났다.

Fig. 9은 Yang and Choi (2010)가 제시한 층간 전단속도에 관한 식 ($u_* = \sqrt{gh_2S}$)으로부터 산정된 전단속도와 이번 실험 자료를 통해 얻은 전단속도를 비교한 것이다. 그림에서 가로축에 제시된 전단속도는 레이놀즈응력 분포로부터 산정된 것이다. 그림에서 본 실험에 의해 산정된 전단속도와 관계식에 의한 전단속도가 비교적 잘 일치하는 것으로 판단된다. 그러나 식에 의한 전단속도가 약간 과소산정 하는 것은 실험조건이 완전한 등류상태가 아니기 때문으로 보인다. 그럼에도 불구하고 상부영역의 수심이 층간전단응력에 가장 주요한 인자임을 확인할 수 있다.

Fig. 10에는 레이놀즈수에 따른 흐름저항계수 (flow resistance or friction coefficient)를 도시하였다. 레이놀즈수 27,000~60,000 범위에서 흐름저항계수는 0.012~0.028 사이에 존재하며 평균값은 0.021을 보였다. 이는 Yang and Choi (2009)가 실험을 통해 제시한 값의 범위 안에 존재하며, Chezy 계수 21.61에 해당하여 타당한 것으로 판단된다.

Fig. 11은 수직방향의 부유사 농도분포를 보여준다. 그

림에서 부유사 농도와 바닥으로부터의 거리는 각각 바닥 근처의 농도 ($c_b = c(z = 0.05H)$)와 식생층의 수심으로 무차원화 하였다. 비교를 위하여 Eq. (11)로부터 산정된 농도를 함께 도시하였다. c_b 의 값을 구하기 위해 측정 자료에서 외삽법을 이용하여 $z = 0.05H$ 에서의 부유사 농도를 결정하였다. 부유사 농도는 대체적으로 수면에서 급격히 증가하고 전반적인 수심에 대해 서서히 증가하다 바닥에서 다시 급격히 증가하는 모양을 보인다. Exp.#7S, #16S, #18S에 대한 Rouse 수는 각각 0.283, 0.180, 그리고 0.291로서 Rouse 수가 감소함에 따라 수체에서 농도분포가 바닥농도에 근접함을 알 수 있다. 구체적으로, 상부영역에서 부유사 농도는 균일한 정도는 비슷하며 식생영역에서 변화가 큰 것으로 확인된다. 이는 경계면에 발생하는 전단층이 식생영역에서 난류를 강화시키고, 반대로 식생영역에서 억제된 난류로 인해 입자의 퇴적률이 증가되기 때문으로 보인다. 또한, Yang and Choi (2010)가 제시한 2층모형이 침수식생 개수로 흐름에서 부유사 농도분포를 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 논문은 침수식생 개수로 흐름의 난류 및 부유사 이동 특성을 조사하기 위한 실험 연구이다. 실험에 사용된 개수로는 폭이 0.5m 길이가 12m이고, 유량, 경사, 수심비 등 흐름조건을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 식생은 직경이 0.002m, 길이 0.04m인 나무 원형 실린더를 사용하였고, 식생 밀도는 3.0m^{-1} 을 유지시켰다. LDA를 이용하여 유속성분을 측정하였고, 직접취수법에 의해 부유사 농도를 측정하였다.

평균유속은 상부영역과 식생영역에서 차이가 뚜렷하게 관찰되었다. 즉, 상부영역에서는 일반 개수로에서와 같이 대수함수 형태의 분포를 보이며, 식생영역에서는 식생항력으로 인하여 유속이 줄어드는 양상을 보였다. 상부영역과 식생영역의 유속은 식생높이 부근에서 변곡점을 형성하며 연결되었다. 실험에 적용된 부유사 농도의 범위는 0.0003~0.001이며, 농도가 크지 않아 유사 투입 여부에 따른 평균흐름과 난류량에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 또한, Huai et al. (2009)이 제시한 3층모형에 의한 유속분포와 비교하였다. 3층모형은 대체적인 유속분포의 양상은 잘 예측하였으나 식생영역에서 유속변화를 관측치보다 균일하게 예측하여 이에 대한 오차가 상부영역까지 전파되는 것으로 나타났다.

레이놀즈응력은 상부영역에서 선형함수로 잘 근사됨을 확인하였고 식생영역에서는 Huai et al. (2009)이 제시한 지수함수 형태로 근사시킬 수 있었다. 그러나 지수함수의

매개변수 α 값은 본 실험 결과에 따르면 Huai et al.이 제시한 20.0보다 큰 50~62 범위에 있는 것으로 확인되었다. 레이놀즈응력 분포를 이용하여 층간 전단속도를 산정하였는데, 공식 ($u_* = \sqrt{gh_s S}$)에 의한 값과 매우 근사하였고 산정된 흐름저항계수의 평균값은 0.021이었다.

침수식생 개수로 흐름에서 부유사 농도분포는 Rouse 수에 따라 차이를 보였다. Rouse 수가 증가함에 따라 수체 전반의 무차원 부유사 농도는 바닥농도와 차이를 보였고, 상부영역의 농도가 매우 균일하게 되는 것으로 나타났다. 이는 전단층에 의해 상부영역에서 난류가 강화되었기 때문이다. 또한, Yang and Choi (2010)가 제시한 농도분포와 비교하였는데, 전반적인 양상을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 기초연구사업의 연구비지원 (과제명: 식생된 개수로 흐름에서 부유사 이동의 수리학적 특성에 대한 실험연구, 과제번호: 313-2007-2-D00820)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Cellino, M., and Graf, W.H. (1999). "Sediment-laden flow in open-channel under noncapacity and capacity conditions." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 5, pp. 455-462.
- Choi, S.-U., and Kang, H. (2004). "Reynolds stress modeling of vegetated open-channel flows." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 42, No. 1, pp. 3-11.
- Choi, S.-U., and Kang, H. (2006). "Numerical investigations of mean flow and turbulence structures of partly vegetated open channel flows using the Reynolds stress model." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 44, No. 2, pp. 203-217.
- Dietrich, W.E. (1982). "Settling velocities of natural particles." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 18, No. 6, pp. 1615-1626.
- Huai, W.X., Zeng, Y.H., Xu, Z.G., and Yang, Z.H. (2009). "Three-layer model for velocity distribution in open channel flow with submerged rigid vegetation." *Advances in Water Resources*, Vol. 32, No. 4, pp. 487-492.
- Jordanova, A.A., and James, C.S. (2003). "Experimental study of bed load transport through emergent vegetation." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 6, pp. 474-478.
- Lopez, F., and Garcia, M. (2001). "Mean flow and turbulence structure of open channel flow through non-emergent vegetation." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 5, pp. 392-402.
- Nepf, H.M., and Vivoni, E.R. (1999). "Turbulence structure in depth-limited, vegetated flow: Transition between emergent and submerged regimes." 28th IAHR congress, Graz, Austria.
- Nepf, H.M., and Vivoni, E.R. (2000). "Flow structure in depth-limited, vegetated flow." *Journal of Geophysical Research*, AGU, Vol. 105, No. C12, pp. 28547-28557.
- Righetti, M., and Armanini, A. (2002). "Flow resistance in open channel flows with sparsely distributed bushes." *Journal of Hydrology*, Vol. 269, No. 1-2, pp. 55-64.
- Simon, A., Bennett, S.J., and Neary, V. (2004). "Riparian vegetation and fluvial geomorphology: problems and opportunities." in *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology* (edited by S.J. Bennett and A. Simon), AGU, Washington DC.
- Tollner, E.W., Bairfield, B.J., Vachirakornwatana, C., and Haan, C.T. (1977). "Sediment deposition patterns in simulated grass filters." *Transactions of ASCE*, Vol. 20, No. 5, pp. 940-944.
- Tollner, E.W., Bairfield, B.J., and Hayes, J.C. (1982). "Sedimentology of erect vertical filters." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 108, No. HY12, pp. 1518-1531.
- Tsujimoto, T. (1999). "Fluvial processes in streams with vegetation." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 37, No. 6, pp. 789-803.
- Tsujimoto, T., Kitamura, T., and Okada, T. (1991). "Turbulent structure of flow over rigid vegetation covered bed in open-channels." KHL Progressive Report 1, Hydr. Lab., Kanazawa University, Japan.
- Woo, H. (2010). "Trends in ecological river engineering in Korea." *Journal of Hydro-environment Research*, IAHR-APD, Vol. 4, No. 4, pp. 269-278.
- Yang, W., and Choi, S.-U. (2009). "Impact of stem flexibility on mean flow and turbulence structure in depth-limited open channel flows with submerged vegetation." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR,

Vol. 47, No. 4, pp. 445-454.

Yang, W., and Choi, S.-U. (2010). "A two-layer approach for depth-limited open-channel flows with submerged vegetation." *Journal of Hydraulic*

Research, IAHR, Vol. 48, No. 4, pp. 466-475.

논문번호: 11-026	접수: 2011.02.23
수정일자: 2011.05.11/05.26	심사완료: 2011.05.26