

수심의 제한을 받는 침수식생 개수로의 평균흐름 예측모형 개발Development of Mean Flow Model for Depth-Limited
Vegetated Open-Channel Flows

양 원 준* / 최 성 옥**

Yang, Wonjun / Choi, Sung-Uk

Abstract

Open-channel flows with submerged vegetation show two distinct flow structures in the vegetation and upper layers. That is, the flow in the vegetation layer is featured by relatively uniform mean velocity with suppressed turbulence from shear, while the flow in the upper layer is akin to that in the plain open-channel. Due to this dual characteristics, the flow has drawn many hydraulic engineers' attentions. This study compares layer-averaged models for flows with submerged vegetation. The models are, in general, classified into two-layer and three-layer models. The two-layer model divides the flow depth into vegetation and upper layers, while the three-layer model further divides the vegetation layer into inner and outer vegetation layers depending on the influence of the bottom roughness. This study compares the two-layer model and the three layer-model. It is found that the two-layer model predicts better the average value of the velocity and the prediction by the three-layer model is sensitive to Reynolds shear stress. In the three-layer model, the mean flow in the inner vegetation layer does not affect the flow seriously, which motivates the proposal of the modified two-layer model. The two-layer model, capable of predicting non-uniform mean velocity, is based on the Reynolds stress which is linear and of power form in the upper and vegetation layers, respectively. Application results reveal that the modified two-layer model predicts the mean velocity at an accuracy similar to the two- and three-layer models, but it predicts poorly in the case of very low vegetation density.

Keywords : open-channel flow, submerged vegetation, mean flow, turbulence, Reynolds stress, two-layer model, three-layer model, modified two-layer model

요 지

침수식생 개수로 흐름은 식생영역과 상부영역에 서로 다른 흐름구조를 보인다. 즉, 식생영역에서 전단으로 인해 생성되는 난류는 억제되며 비교적 균일한 유속 분포를 보이며 상부영역에서는 일반 개수로 흐름과 유사한 흐름구조를 보인다. 이와 같이 두 상이한 흐름구조가 결합된 복잡한 흐름 특성으로 인해 침수식생 개수로 흐름은 공학적인 관심의 대상이 되어왔다. 본 연구에서는 침수식생 개수로 흐름의 층적분 모형의 비교 분석을 수행하였다. 일반적으로 식생흐름의 층적분 모형은 층의 수에 따라 2층 및 3층모형으로 구분한다. 즉, 전체 수심을 식생영역과 상부영역으로 구분하는 2층모형과 식생영역을 바닥 조도의 영향 유무에 따라 내부 및 외부 식생영역으로 구분하는 3층모형으로 분류된다. 본 연구에서는 2층모형과 3층모형을 비교하였다. 다양한 실험조건에 적용한 결과, 3층모형이 식생영역에서 유속의 변화를 고려할 수

* 교신저자, 한국환경정책평가연구원 국가기후변화적응센터 박사후연구원 (e-mail: wj_yang@kei.re.kr)
Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute

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

있으나 결과는 레이놀즈응력 분포에 민감하며, 적분된 유속은 2층모형에 의한 예측 결과가 더욱 정확한 것으로 나타났다. 3층모형에서 내부 식생영역의 결과가 전체 흐름구조에 미치는 영향이 무시할 수 있으므로 이 점을 착안하여 식생영역에서 유속 변화가 고려되는 수정 2층모형을 제시하였다. 수정 2층모형에서 가정하는 레이놀즈응력 분포는 상부영역에서는 선형, 식생영역에서는 멱함수 형으로 변화한다. 다양한 조건에 적용한 결과, 수정 2층모형이 대체로 기존의 모형과 비슷한 정도의 예측을 수행하나 식생밀도가 매우 작은 흐름의 경우 예측 결과가 불량한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 개수로 흐름, 침수식생, 평균흐름, 난류, 레이놀즈응력, 2층모형, 3층모형, 수정 2층모형

1. 서 론

하천에 존재하는 식생은 동/식물의 서식처 제공, 하천 경관의 다양화, 생물학 및 수리학적 다양성 제공과 같은 여러 가지 기능과 역할을 수행하고 있다. 이 같은 기능 중 자연 저항체로서의 식생은 유체역학적으로 하천의 평균 흐름과 난류량을 변화시키게 되며, 그 결과 유사, 영양 물질, 용존 산소, 그리고 서식 동물 등에 많은 영향을 미친다. 하천 내 식생은 일차적으로 유수에 의한 항력을 유발하여 평균유속을 줄이며 통수능을 감소시켜 홍수 시 수위를 증가시키지만, 이는 하도의 토사 침식을 억제함으로써 하천수의 탁도 경감 혹은 오염물질 여과를 통한 수질 개선과 같은 기능을 수행하게 된다. 최근의 실험유체역학적 연구들은 식생흐름에 대한 세밀한 구조를 제시해주고 있다.

개수로 흐름은 하천 수심과 하상에 식재된 식생의 높이에 따라 식생피복 흐름 (terrestrial canopy flow), 침수식생 흐름 (flow with submerged canopy), 정수식생 흐름 (flow through emergent canopy)으로 구분된다. 다양한 흐름 조건 중 하천 수심이 식생높이에 비해 그다지 크지 않은 침수식생 개수로 흐름은 식생높이를 기준으로 상·하층의 흐름특성이 상이하고, 각층의 흐름은 식생밀도, 식생 높이, 수심비와 같은 식생조건 및 유속, 수심, 하천 경사와 같은 흐름조건에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 복합적인 특성을 보이는 침수식생 흐름은 기존의 수심 적분모형 (Manning 공식, Darcy-Weisbach 공식, Chezy 공식)을 사용할 경우 식생 하층영역에서는 평균유속의 과대 산정되거나 혹은 식생 상층 영역에서는 과소산정을 할 위험이 있다.

최근 들어 개수로 흐름에 존재하는 식생이 생태 및 환경에 미치는 영향에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이를 뒷받침 하기위해 많은 연구가 수행되어 왔다. 그러나 대부분의 연구는 침수식생 개수로 흐름의 평균유속 분포와 난류구조의 측정 (Tsujiimoto and Kitamura, 1990; Ikeda and Kanazawa, 1996); Nepf and Vivoni, 2000; Ghisalbert and Nepf; 2002; Wilson et al., 2003) 및 수치모의(Shimizu

and Tsujimoto, 1994; Lopez and Garcia, 1998; Neary, 2003; Choi and Kang, 2004)가 주를 이루어 왔다. 이 같은 학술적 연구뿐만 아니라 실제 하천환경에 식생이 미치는 영향을 파악하고자 하는 침수식생으로 인한 개수로 흐름의 조도개수 또는 통수능 변화에 대한 연구 또한 꾸준히 이루어지고 있는 실정이다. Ree and Crow (1977), Kouwen and Fathi-Maghadam (2000)은 식생으로 인한 바닥저항력 상승에 대한 경험식을 제시하였고, Stone and Shen (2002), Huthoff et al. (2007)은 차원해석과 같은 방법을 이용하여 해석적인 층평균된 유속 산정식을 개발하였고, 2층모형의 적용성을 확인하였다. 또한, Klopstra et al. (1997)과 Baptist (2005)는 개수로에 식생이 존재할 경우의 평균유속 분포에 대한 해석해를 제시하였다.

앞에서 언급한 것과 같이 식생이 존재하는 개수로 흐름에 대해 다양한 관계식이 경험식과 해석해의 형태로 제시되었다. 그러나 경험식은 적용성이 떨어지며, 해석해는 산정방법 및 산정식의 형태가 매우 복잡하기 때문에 적용성 및 정확성이 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 기존의 다양한 방법을 참고하여, 침수식생 개수로 흐름의 평균유속 산정하는 모형을 제시하고자 한다. 본 연구에서 제안한 모형을 검증하기 위해 저자가 수행하여 발표한 다양한 논문의 자료뿐만 아니라, 수집이 가능한 문헌 자료에 대한 모형의 적용을 수행하여 모형의 정확성을 평가하였다.

2. 평균유속 및 난류구조 예측 모형

침수식생 개수로의 평균유속 공식은 여러 연구자들에 의해 제시되어왔다. 이들 모형의 가정 및 적용조건을 살펴보면, 크게 식생영역 및 상부영역으로 구분하는 2층모형 (Huthoff et al., 2007; Yang and Choi, 2009)과 식생영역을 바닥단응력이 영향을 미치는 범위에 따라 더욱 세분하는 3층모형 (Velasco et al., 2008; Huai et al., 2009)으로 구분할 수 있다. 각 유형의 모형에 대한 설명은 다음과 같다.

2.1 2층모형

침수식생 개수로 흐름은 Fig. 1에 도시한 것과 같이 식생층 (vegetated layer)과 그 위의 상층 (upper layer)으로 구분할 수 있다. 그림의 식생영역은 식생으로 인해 발생하는 항력이 주된 저항요소인 영역으로서 유속의 크기는 상부영역에 비해 작은 편이며, 유속분포는 전 영역에 걸쳐 비교적 균일한 것으로 알려져 있다 (Tsujimoto and Kitamura, 1990). 일반 개수로 흐름에서 중요한 바닥 전단력은 식생항력에 비해 작기 때문에 극히 한정된 바닥근처를 제외하고는 큰 영향을 미치지 못한다. 또한 식생높이 이상인 상부영역은 식생영역에 비해 큰 평균유속을 가지며, 대수식 형태의 유속 분포, 그리고 층간전단력에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

침수식생 개수로 흐름의 식생영역에서 힘의 평형을 고려하면, 중력, 바닥저항력, 식생항력, 그리고 층간전단력 (interfacial shear stress)이 균형을 이루며, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau_i + \rho g h_1 S = \rho C_b U_1^2 + F_D \quad (1)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, h_1 은 식생영역 높이, S 는 수로 경사, C_b 는 바닥 저항계수, U_1 는 식생영역 층평균유속, τ_i 는 층간전단력, 그리고 F_D 는 식생항력이다. Eq. (1)에 층간전단력과 식생항력을 대입하면 다음 같이 정리할 수 있다.

$$\rho g (H - h_1) S + \rho g h_1 S = \rho C_b U_1^2 + \frac{1}{2} \rho C_D h_1 a U_1^2 \quad (2)$$

여기서 h 는 수심, a 는 식생밀도, C_D 는 식생의 항력계수이다. Eq. (2)에서 바닥 저항력을 무시하고, 식생영역 평균 유속 (U_1)에 대해 정리하면 다음과 같은 산정식을 얻을 수 있다.

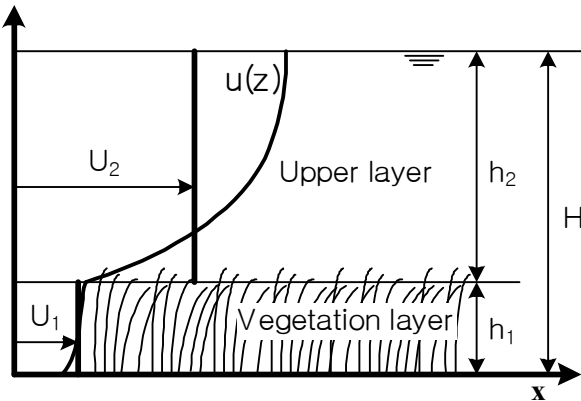


Fig. 1. A Schematic Sketch of the Two-layer Model

$$U_1 = \sqrt{\frac{2gHS}{aC_D h_1}} \quad (3)$$

Eq. (3)은 Stone and Shen (2002)과 Huthoff et al. (2007)이 제시한 산정식과 유사한 형태를 가지고 있다. 식생영역에 해석적인 방법을 적용하면 비교적 단순한 힘의 평형만을 고려하기 때문에 대부분의 연구가 동일한 형태의 산정식을 제시하게 되는 것이다.

상부영역의 경우, 기존 연구결과를 따르면, 대수식 형태의 유속 분포를 보이지만, 기울기 및 시작점에 대해 다양한 값들을 갖는 것으로 나타나 있다 (Stephan and Gutknecht, 2002). 본 연구에서는 기존의 연구결과 및 식생영역과의 연속성을 유지하기 위해 다음과 같은 유속 분포식을 제안하였다.

$$\frac{u(z)}{U_1} = \frac{u_*}{U_1} \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{h_1}\right) + 1 \quad (4)$$

여기서 κ 는 von Karman 상수 (=0.41), u_* 는 층간전단속도이다. 이를 상부영역 높이 (h_2)에 대해 적분하면, 다음과 같은 상부영역의 층평균 유속 산정식을 얻을 수 있다.

$$U_2 = U_1 + \frac{u_*}{\kappa} \left[\frac{H}{h_2} \ln\left(\frac{H}{h_1}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

여기서 U_2 는 상부영역의 층평균 유속이다. Eq. (3) and Eq. (5)를 이용하면 다음과 같은 침수식생 개수로 흐름의 평균유속 산정식과 조도계수 산정식을 얻을 수 있다.

$$U = \left[\left(\frac{\ln(D)}{\kappa} + \frac{1}{C_v D} \right) \sqrt{h_2} H^{-2/3} \right] H^{2/3} S^{1/2} \quad (6)$$

$$n_v = \frac{H^{2/3}}{\left(\frac{\ln(D)}{\kappa} + \frac{1}{C_v D} \right) \sqrt{h_2}} \quad (7)$$

여기서 D 는 수심비 (H/h_1), C_v 는 유속비 (u_*/U_1)이다.

2.2 3층모형

Lopez and Garcia (1998)와 Yang and Choi (2009) 등 기존의 실험 및 수치모의에 의한 연구는 침수식생 개수로 흐름의 식생영역에서 평균유속과 레이놀즈응력이 수심에 대해 일정하지 않음을 보였다. 이를 고려하기 위하여 Huai et al. (2009)은 Eq. (1)을 수심에 대해 미분한 다음과 같은 운동량 방정식을 제시하였다.

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} + \rho g S - \frac{1}{2} \rho C_D m D_v u^2(z) = 0 \quad (8)$$

여기서 m 은 식생 1주당 점유 면적 (=1/($L_s l_s$)), D_v 는 식생의 직경이다. Huai et al. (2009)은 수로 바닥의 조도를 고

려하기 위하여, 침수식생 개수로의 식생영역을 내부 식생영역 (inner vegetated layer)과 외부 식생영역 (outer vegetated layer)으로 구분하였다. Huai et al. (2009)은 바닥에서 비활조건을 사용하여 내부 식생영역에서의 유속 분포를 구하였고, 상부영역과 식생영역 사이 경계면에서의 전단속도를 이용하여 외부 식생영역 유속분포를 구하였다. 이렇게 구한 유속분포는 내부 및 외부 식생영역의 경계면에서 서로 일치할 때까지 반복계산을 수행하였다. 내부 식생영역의 경우 Rowinski and Kubrak (2000)이 제시한 하상에서의 혼합거리 가설을 적용할 경우 다음과 같은 전단응력의 수직분포식을 제시할 수 있다.

$$\tau = \rho l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \quad (9)$$

여기서 l_m 은 혼합거리이고 바닥 근처에서는 개수로의 조고 (roughness height)와 동일한 값을 갖는다. Rowinski and Kubrak (2002)와 Righetti and Armanini (2002)는 l_0 의 값으로 식생높이의 10%로 제시하였다. Eq. (9)를 Eq. (8)에 대입하면 다음과 같은 내부 식생영역의 평균유속 분포식을 얻을 수 있으며, 이를 유한차분법을 이용하여 해석할 경우 주어진 조건에 알맞은 내부 식생영역의 평균유속 분포를 얻을 수 있다. 외부 식생영역의 경우, Huai et al. (2009)는 다음과 같은 지수형태의 전단응력 분포식 및 경계면 전단속도 산정식을 제시하였다.

$$\tau = -\overline{\rho u w} = -\overline{\rho u w} \Big|_{z=h_1} \times \exp[\alpha(z-h_1)] \quad (10)$$

$$-\overline{\rho u w} \Big|_{z=h_1} = gh_2 S \quad (11)$$

여기서 α 는 경험상수로 레이놀즈응력 분포를 이용하여 산정할 수 있다. Huai et al. (2009) 그들의 수리실험에 근거하여 $\alpha=20$ 을 제시하였으며, 유속분포 예측 시 0.1~30 사이의 값을 사용하였다. Eqs. (10) and (11)을 Eq. (8)에 대입하면, 다음과 같은 외부 식생영역에서의 유속분포식을 얻을 수 있다.

$$u = \sqrt{\frac{2gS\{ah_2\exp[\alpha(z-h_1)]+1\}}{C_D m D_v}} \quad (12)$$

상부영역의 경우, 점성항을 무시한 운동량 방정식을 수심에 대해 적분한 후 Prandtl 혼합거리 이론을 적용하면 다음과 같은 유속분포식을 얻을 수 있다.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[1 + \frac{\kappa(z-h_1)}{l_0} \right] + \sqrt{\frac{2(ah_2+1)}{C_D m D_v h_2}} \quad (13)$$

여기서 l_0 는 경계면 ($z=h_1$)에서의 혼합거리이며, 이는 일반적으로 실험자료를 이용하여 산정할 수 있다. Righetti and Armanini (2002)는 수리실험을 통하여 $l_0 = 0.1 h_1$ 이라고 보고하였으며, 본 연구에서는 Righetti and Armanini (2002)가 제시한 값을 3층모형의 적용에 사용하였다.

3. 모형 적용 및 분석

본 연구에서는 기존에 제시된 침수식생 개수로에 적용 가능한 2층 및 3층모형의 적용성을 분석하고자 한다. 다음 Table 1에 도시된 것과 같이 다양한 조건의 수리 및 식생조건에 대한 실험자료에 대하여 적용한 후 각 모형의 적합성을 분석하였다. 각 실험조건은 2층 및 3층모형의

Table 1. Experimental Conditions for Formerly Conducted Laboratory Experiments

연구자	레이놀즈수 (-)	식생유연성 (-)	식생밀도 (m^{-1})	수심비 (-)	수심 (m)
Yang & Choi (2009)	16,555	F	2.68	1.57	0.055
	16,575	F	2.68	2.14	0.075
	22,425	F	2.68	2.14	0.075
	17,380	F	2.68	3.14	0.11
	26,920	F	2.68	3.14	0.11
	15,675	R	2.68	2.14	0.075
	23,550	R	2.68	2.13	0.075
Nepf & Vivoni (2000)	42,856	F	5.1	2.75	0.44
Wilson et al. (2003)	48,000	F	22.4	3.40	0.357
	39,000	F	1.67	3.40	0.29
최성욱 등 (2003)	63,000	R	0.5	2.00	0.3
Lopez (1997)	175,000	R	1.09	2.84	0.335
	44,000	R	1.09	1.81	0.214
Ghisalberti & Nepf (2004)	38,000	R	8.0	3.36	0.467

개발에 사용되지 않은 실험자료를 이용하였으며, 다양한 수심비, 레이놀즈수, 식생밀도, 식생유연성 그리고 수심비를 포함되도록 구성하였다. 이를 이용하여 각 모형의 가정사항 및 적용 결과를 분석하였다.

3.1 레이놀즈응력

침수식생 개수로에서는 식생영역과 상부영역 사이에서 발생하는 층간전단응력 (interfacial shear stress)이 운동량 및 질량의 수직방향 이동에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Ikeda and Kanazawa, 1996; Ghisalberti and Nepf, 2002). Fig. 2에는 Eq. (11)을 이용하여 산정된 층간전단속도 (interfacial shear stress)를 실험에 의한 측정치와 비교를 하였다. 실험자료를 이용하는 경우 상부영역에서 레이놀즈응력이 선형으로 감소한다고 보고 경계면에서 층간전단속도를 산정할 수 있다. 그림에 도시된 자료는 곧은 식생을 이용한 실험 (Lopez, 1997; Lopez and Garcia, 1998; Ghisalberti and Nepf, 2004; 최성욱 등, 2003; Yang and Choi, 2009) 및 유연한 식생을 이용한 실험 (Ikeda and Kanazawa, 1996; Nepf and Vivoni, 2000; Wilson et al., 2003; Yang and Choi, 2009)으로부터 도출한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 Eq. (11)을 이용하여 산정한 층간전단속도가 측정값과 비교적 유사한 것을 확인할 수 있다. 이는 기존에 알려진 것과 같이, 상부영역의 레이놀즈응력분포가 선형적인 감소를 보이는 일반 개수로와 유사한 것임을 나타냄과 동시에 침수식생 개수로 흐름의 경계면 전단속도 산정에 Eq. (11)을 적용하는 것이 큰 무리가 없다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 레이놀즈응력분포가 제시되지 않은 수리실험의 경우 Eq. (11)을 이용하여 층간전단속도를 산정하였다.

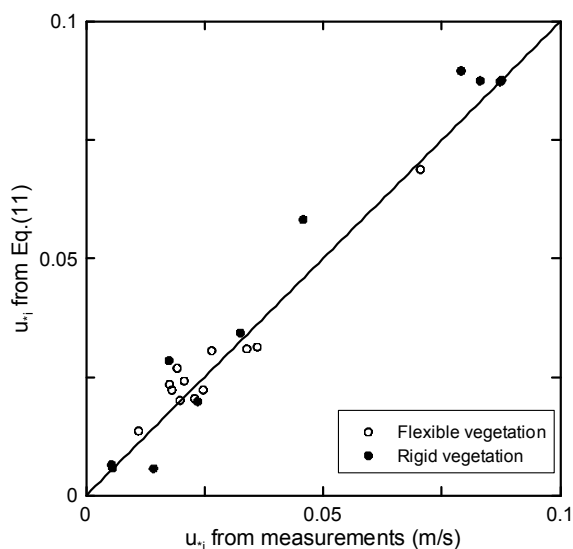


Fig. 2. Comparison of Interfacial Shear Velocity in Vegetated Open-channel Flow

3.2 평균유속

본 절에서는 기존의 다양한 조건에 대하여 수행된 수리실험에 각각의 모형을 적용하여 모형의 예측능력을 평가하고자 한다. 다음 Figs. 3 and 4는 식생 밀도와 수심비 (H/h)가 서로 다른 각각의 수리실험에 대하여 2층 및 3층모형을 적용한 결과이다. 이때 살펴보고자 하는 인자를 제외한 나머지 실험조건 및 항력계수와 같은 상수는 가능한 유사한 실험을 선택하였다. 그림에서 기호는 해당하는 수리실험의 측정자료, 실선은 2층모형, 그리고 점선은 3층모형의 적용결과이다.

Fig. 3은 식생의 밀도에 따른 2층 및 3층모형의 적용성을 살펴본 것이다. Figs. 3(a) and 3(b)는 각각 식생밀도가 $5.0 m^{-1}$ 미만과 초과하는 경우에 해당하는 평균유속 분포이다. 그림에서 기준이 되는 식생밀도 ($a=5.0 m^{-1}$)는 Poggi et al. (2004) and Raupach (1984)의 연구결과에 따라 결정된 것이다. Raupach (1984)는 기존의 다양한 풍동실험 자

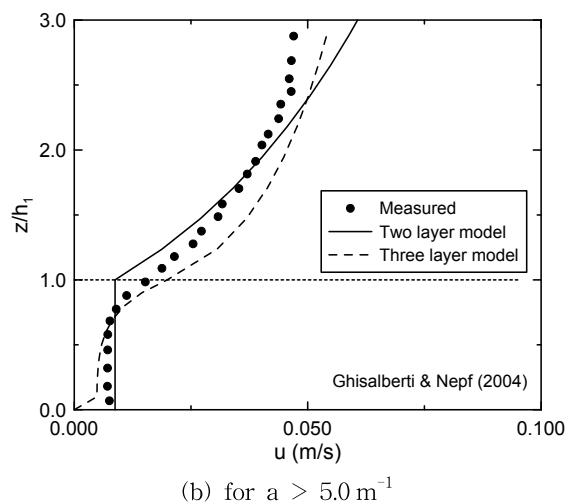
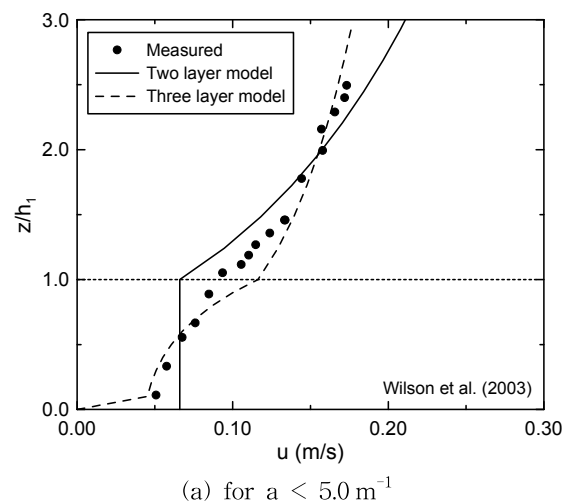
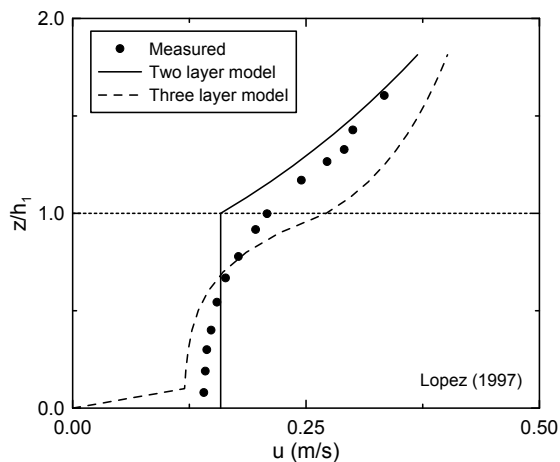


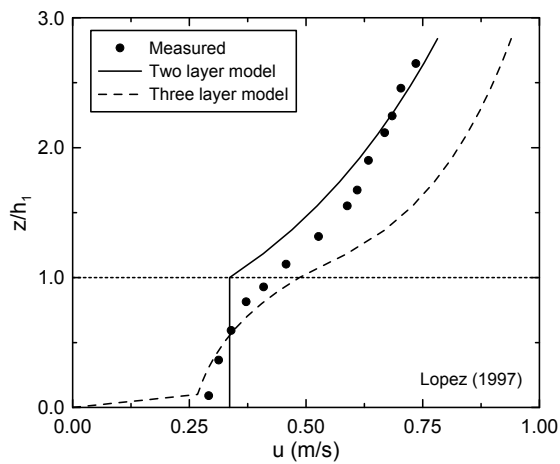
Fig. 3. Impact of Vegetation Density on the Mean Velocity

료를 이용하여 식생흐름에서 식생밀도와 평균유속 수직 분포와의 상관관계에 대하여 연구하였고, 이때 식생밀도가 증가할 경우 u_s/u_b (여기서 u_b 는 식생높이에서의 평균 유속)가 증가하고, 식생밀도가 $5.0 m^{-1}$ 을 초과할 경우에는 일정한 값으로 수렴되는 것을 보고하였다. Poggi et al. (2004)과 Yang and Choi (2009)는 이와 같은 현상이 침수 식생 개수로에서도 동일하게 발생하는 것을 수리실험을 통하여 증명하였다.

그림에서 볼 수 있듯이 2층모형과 3층모형 모두 식생밀도의 변화에 관계없이 비교적 정확하게 유속분포를 예측하는 것을 볼 수 있다. 식생밀도가 작은 경우에는 식생영역에서의 속도경사가 크기 때문에 유속이 균일하다고 보는 것은 무리가 있어 2층모형의 적용성이 떨어지는 것으로 보이지만, 이는 앞에서 언급한 2층모형의 가정사항에 기인한 것이며 이에 대한 수정이 필요할 것으로 판단된다. 식생밀도가 커질 경우에는 식생영역의 수직방향 유속 분포가 균일해지는 경향이 나타나고, 이때에는 2층모형의



(a) for $H/h_1 < 2.0$



(b) for $H/h_1 > 2.0$

Fig. 4. Impact of Depth Ratio on the Mean Velocity

유속분포 예측결과도 비교적 정확한 것으로 나타났다.

Fig. 4는 수심비 (H/h_1)에 따른 두 모형의 적용성을 분석한 것이다. Figs. 4(a) and 4(b)는 각각 수심비가 2.0 미만과 초과하는 경우 평균유속 분포를 도시한 것이다. 식생영역에서의 예측결과를 보면, 수직방향 유속분포는 3층모형이 비교적 정확하게 예측하고 있는 것처럼 보이지만, 경계면에서의 유속이 과대 산정되는 것을 볼 수 있다. 상부영역은 두 모형 모두 경계면에서의 평균유속에 영향을 받기 때문에 측정자료와 잘 일치하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 2층모형의 경우 균일한 유속분포를 가정하였기 때문에 3층모형에 비해 경계면 부근에서의 속도경사를 과대산정하는 경향이 있는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 측정된 유속과 2층 및 3층모형을 이용하여 예측한 유속분포의 층적분된 유속을 비교한 것이다. 대부분의 경우 두 모형 모두 측정된 유속과 잘 일치하는 결과를 보여주고 있지만, 평균제곱근오차에 의하면 2층모형이 조금 더 정확한 것으로 나타났다. 이는 3층모형의 매개변수 (a 와 l_0)가 다양한 흐름 및 식생 조건에 따른 변화를 반영하지 못하기 때문으로 보인다.

Fig. 6은 기존에 제시된 다양한 조도계수 산정식(Thompson and Robertson, 1976; Darby, 1999; Hoffman and Meer, 2002)을 이용하여 얻은 Manning 조도계수와 본 연구에서 제시한 Eq. (7)을 이용하여 산정된 조도계수를 비교한 것이다. 비교에 사용된 Manning 조도계수는 Ikeda and Kanazawa (1996), Lopez (1997), Nepf and Vivoni (2000), Wilson et al. (2003), Ghisalberti and Nepf (2006) 등의 수리실험 자료로부터 얻은 값이다. Darby (1999)의 경우 본 연구와 유사한 형태의 2층모형을 이용하여 Manning 조도

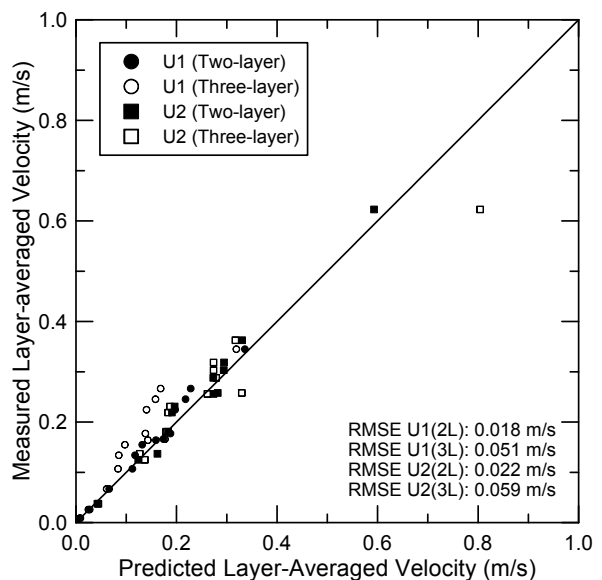


Fig. 5. Comparison between Predicted and Measured Layer-averaged Velocities

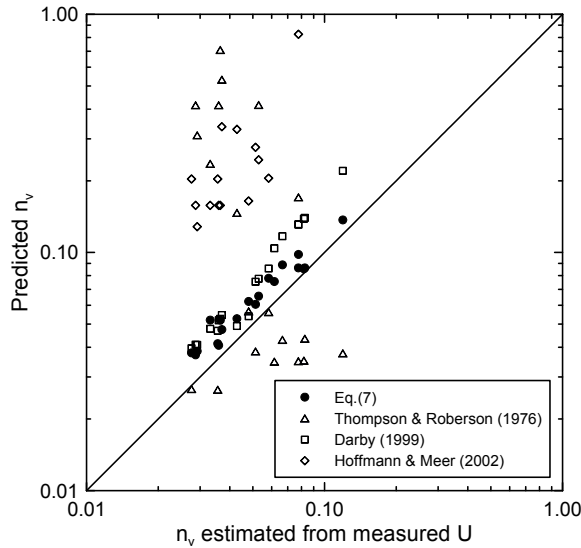


Fig. 6. Comparison of Predicted Manning's Roughness Coefficient

계수 산정식을 제시하였고, Thompson and Robertson (1976)과 Hoffman and Meer (2002)는 다양한 수리실험 자료 분석을 통해 개발된 경험식이다. 적용된 조도계수 산정식 중 Darby (1999)와 Eq. (7)에 의한 조도계수의 값이 실험값과 근사한 것으로 나타났다. 그러나 그림에서 볼 수 있듯이 Thompson and Robertson (1976)과 Hoffman and Meer (2002) 공식의 경우에는 모형의 개발에 사용된 자료와 유사한 특정 조건을 제외하고는 예측결과가 매우 불량한 것을 알 수 있다.

3.3 2층모형의 개선

본 절에서는 기존의 2층모형과 3층모형의 장점을 취합하여 개선된 2층모형을 제시하고자 한다. 앞에서 언급한 것과 같이 2층모형은 식생영역 내부에서 평균유속이 균일하다고 가정하였기 때문에 속도경사를 필요로 하는 와점성계수를 산정하는 것이 불가능하다. 3층모형의 경우 레이놀즈응력분포 산정식에서 사용되는 경험상수 (a)를 사용하는 것과, 이를 통하여 얻는 레이놀즈응력의 수직분포가 실제 레이놀즈응력과는 잘 일치하지 않는 경향을 보이게 된다. 또한, 3층모형의 내부 식생영역 (inner vegetation layer)은 전체 흐름에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 단순화를 위해 무시할 필요가 있다. 이 같은 단점들을 보완하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 레이놀즈응력 분포식을 제안하였다.

$$-uw = u_*^2 \left(\frac{z}{h_1} \right)^n \text{ for vegetation layer} \quad (14a)$$

$$-uw = u_*^2 \left(\frac{H}{h_2} - \frac{z}{h_2} \right) \text{ for upper layer} \quad (14b)$$

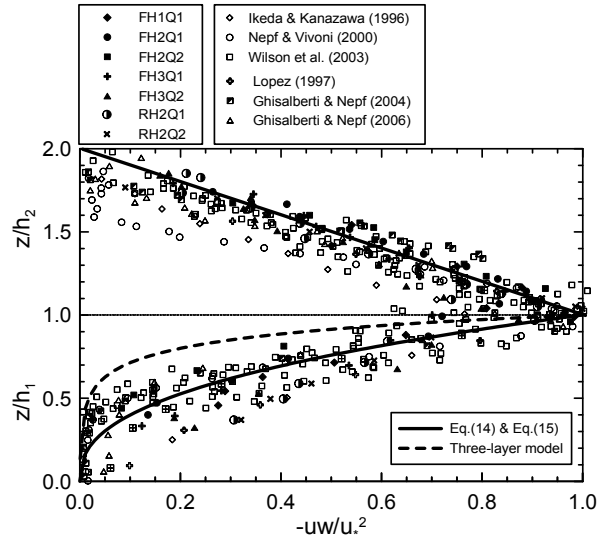


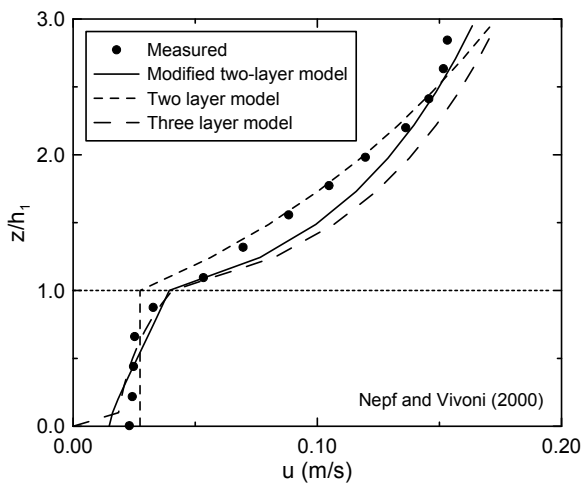
Fig. 7. Application of Eq. (14) & (15) for Reynolds Shear Stress to Experimental Data

여기서 n 은 식생영역에서 레이놀즈응력의 분포를 결정하는 계수이고, h_2 는 상부영역 ($=H-h_1$)의 높이이다. 일반적으로 식생영역에서의 레이놀즈응력의 분포 형태는 수심비, 식생밀도, 식생항력 등과 같은 식생조건과 연관되어 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 다양한 수리실험 자료를 이용하여 최적의 n 값을 도출하였다.

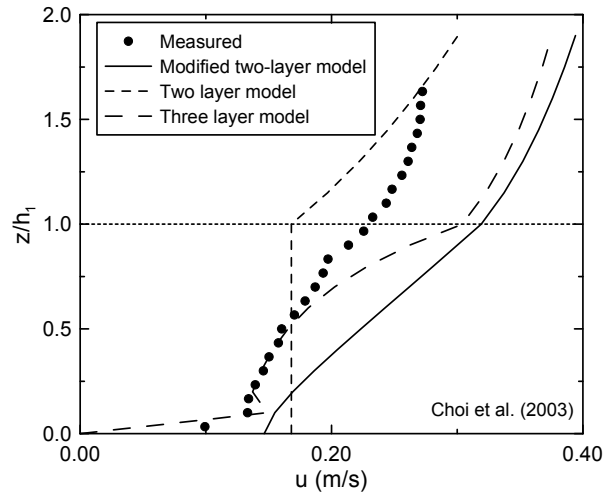
Fig. 7은 다양한 수리실험 조건별 침수식생 개수로의 레이놀즈응력 분포를 도시한 것이다. 레이놀즈응력에 관한 각 모형의 가정 사항은 다음과 같다. 상부영역의 경우, 2층 및 3층모형 모두 선형분포를 가정하였다. 식생영역에 있어서는 두 모형의 가정 사항이 서로 다르다. 즉, 3층모형의 경우 식생 하부에서는 지수함수 형태를 보이는 것으로 가정하였지만, 2층모형은 식생조건에 큰 영향을 받는 것으로 판단하였다. 또한, 2층모형은 평균유속 산정에 있어, 식생영역의 레이놀즈응력 분포를 필요로 하지 않기 때문에 레이놀즈응력의 산정식이 제시되지 않고 있다. 그림에서 점선으로 표시한 것은 Huai et al. (2009)이 제시한 식생영역에서의 레이놀즈응력 분포인 Eq. (10)을 도시한 것이다. Huai et al.는 Eq. (10)의 적용에 필요한 α 를 직접 수행한 수리실험에서 측정된 레이놀즈응력 분포의 회귀 분석을 통하여 산정하였고 $\alpha=20.1$ 이라는 값을 제시하였다. Fig. 7에 의하면 Huai et al. (2009)이 제시한 $\alpha=20.1$ 을 사용하는 경우, Eq. (10)이 식생층의 레이놀즈응력을 심각하게 과소 산정하는 것으로 나타났다. 기존 수리실험 자료에 본 연구에서 제안된 Eqs. (14a) and (14b)를 동시에 도시한 결과, 상부영역에서는 선형적인 분포를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 식생영역에서 레이놀즈응력은 흐름 및 식생조건에 따라 분산되는 경향을 보인다. 본

연구에서는 회귀분석을 통하여 가장 범용적인 계수를 결정하였는데, $n=2.5$ 일 경우 기존 실험자료와 잘 일치하는 것으로 나타났다. Eq. (14b)에 의하면 Nepf and Vivoni (2000)가 제안한 침투수심 (penetration depth)이 자동적

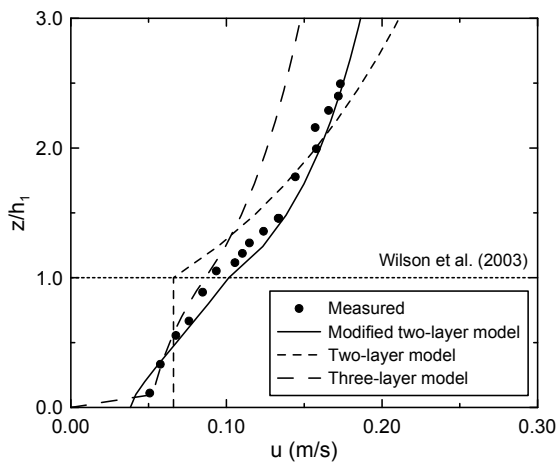
으로 결정되는데, 본 연구에서 제시한 n 에 대해 침투수심은 식생높이의 약 40%인 것으로 나타났다. 이는 Nepf and Vivoni (2000)이 제시한 값 (식생높이의 20~60%)의 범위 안에 있는 것을 알 수 있다.



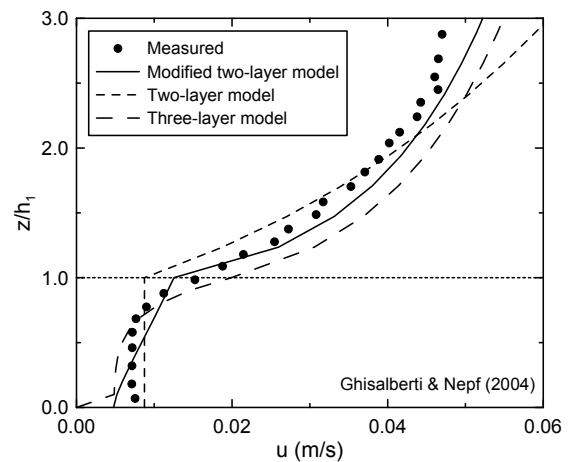
(a) For Small Aspect Ratio



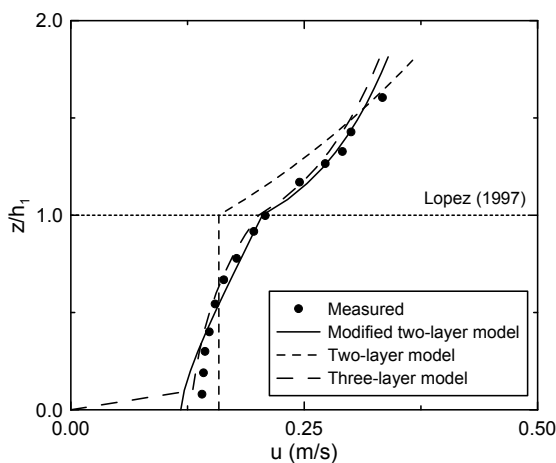
(b) For Very Low Vegetation Density



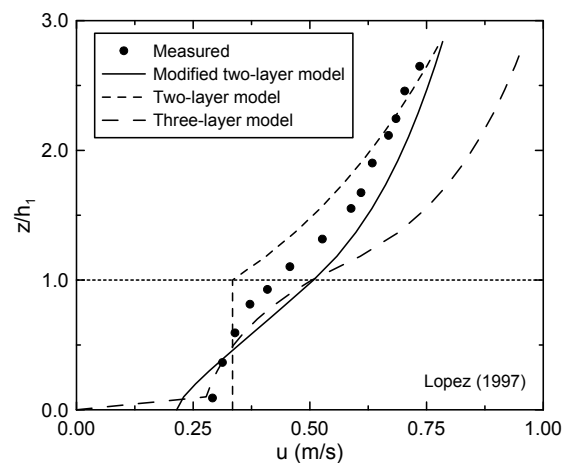
(c) For $a < 5.0 \text{ m}^{-1}$



(d) For $a > 5.0 \text{ m}^{-1}$



(e) For $H/h_1 < 2.0$



(f) For $H/h_1 > 2.0$

Fig. 8. Applications of Modified Two-layer Model

Eq. (14)에 제시된 레이놀즈응력 분포를 Eq. (8)에 대입하면, 다음과 같은 식생영역에서의 유속분포 식을 구할 수 있다.

$$u(z) = \sqrt{\frac{2gS}{aC_D} \left[\frac{2.5h_2}{h_1} \left(\frac{z}{h_1} \right)^{3/2} + 1 \right]} \text{ for vegetated layer (15a)}$$

상부영역에서의 유속분포는 Huai et al. (2009)에 제시된 혼합거리 이론으로부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left[1 + \frac{\kappa(z-h_1)}{l_o} \right] + \sqrt{\frac{2S}{aC_D} \left[\frac{2.5}{h_1} \left(\frac{z}{h_1} \right)^{3/2} + \frac{1}{h_2} \right]} \text{ for upper layer (15b)}$$

여기서 대수식 분포의 상수를 구하기 위하여 식생영역과 상부영역의 경계면에서 연속성을 고려하였다.

Fig. 8은 위에 제시된 Eqs. (15a) and (15b)를 사용하여 다양한 조건에서 평균유속 분포를 예측한 것이다. 수로 폭, 식생밀도, 그리고 수심비의 영향을 검토하였다. Fig. 8(a)은 Nepf and Vivoni (2000)의 실험 조건을 재현한 것이다. 실험에 사용된 수로는 폭과 수심이 각각 0.45m와 0.35m로서 수심비가 매우 큰 경우에 해당한다. 이 경우 수로 단면 전체에 걸쳐 2차 흐름이 존재하며 이는 평균유속 분포에 크게 영향을 미칠 것으로 예상된다. Fig. 8(b)은 최성욱 등 (2003)에 제시된 실험 조건을 부여한 것으로 식생영역에서의 식생밀도가 $1.5 m^{-1}$ 로 기존 Yang and Choi (2009)의 연구결과인 식생밀도 $5.0 m^{-1}$ 에 비해 작은 것이 특징이다. 식생밀도가 작은 침수식생 흐름에서는 식생영역의 레이놀즈응력 분포가 일반 개수로와 유사하여 멱함수 형태의 분포 (Eq. (14a))와 큰 차이를 보일 것으로 예상된다. Figs. 8(c)~(f)는 앞의 적용사례와 비슷하게 식생밀도 및 수심비의 영향을 보기 위한 것이다. Eq. (15b)에서 경계면에서의 혼합거리 l_o 는 식생영역 크기의 10%를 사용하였다. 비교를 위하여 기존의 2층 및 3층모형에 의한 예측 결과도 함께 도시하였다.

전반적으로 기존 2층모형에 의한 결과는 양호한 것으로 보이나, 식생밀도가 매우 낮은 경우 상부영역의 유속 분포는 예측을 잘 못하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 3(a)의 결과와 일치한다. 또한, 식생영역에서의 유속의 변화가 큰 경우 균일한 분포를 예측하는 것이 가장 큰 단점으로 판단된다. 3층모형은 식생밀도가 매우 낮은 경우 (Figs. 8(b) and (c))를 제외하고는 식생영역에서의 유속 분포를 잘 예측하지만, 상부영역에서는 대부분의 경우 예측결과가 불량한 것으로 나타났다. 수정 2층모형은 폭이 좁은 수로에서 상부영역의 평균유속을 약간 과대 산정하며 (Fig. 8(a)), 식생밀도가 매우 낮은 경우 식생영역 및 상부영역에서 평균유속을 부정확하게 예측하는 것으로 나

타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 침수식생 개수로 흐름의 평균유속 및 다양한 난류량 예측이 가능한 해석적 모형의 비교 분석을 수행하였다. 전체 흐름영역을 식생영역과 상부영역으로 구분하는 2층모형과 식생영역을 다시 세분하여 하상의 영향이 지배적인 내부 식생영역을 추가시킨 3층모형이 있다. 2층모형의 경우 기존 다양한 연구자들에 의해 개발되어왔으며, 이 중 가장 최근에 제시된 Choi and Yang (2010)의 모형을 본 연구에서 이용하였다. 또한, 비교대상인 3층모형으로는 Huai et al. (2009)이 제시한 모형을 사용하였다. 각 모형의 비교분석에 사용한 자료는 기존의 다양한 연구자가 제시한 수리실험 결과를 이용하였다. 기존의 연구자료 중, 수심비, 식생유연성, 그리고 식생밀도가 서로 다른 수리실험 자료를 사용하였다.

2층모형과 3층모형에 있어서 가장 중요한 변수인 레이놀즈응력의 경우, 상부영역에서는 선형분포를 가정한 두 모형 모두 큰 문제가 없는 것으로 나타났다. 그러나 식생영역의 경우 3층모형에서 가정한 지수함수 형태의 레이놀즈응력은 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다. 식생영역에서의 레이놀즈응력은 침투수심의 존재여부와 식생조건 등에 영향을 받지만, 비교적 선형적인 분포를 보이기 때문에 이에 대한 2층모형의 가정사항이 비교적 정확한 것으로 판단할 수 있다. 또한, 침수식생 개수로의 흐름 특성을 나타내는 경계면 전단속도 산정식을 제시하였으며 다양한 사례에 대하여 적용성을 입증하였다.

평균유속의 경우 수심비 및 식생밀도에 따른 각 모형의 적용성을 살펴본 결과, 3층모형에서 추가된 내부 식생영역은 전체적인 예측결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 예측된 평균유속의 경우 식생밀도 및 수심비의 변화에 관계없이 두 모형 모두 비교적 정확한 유속분포를 예측하는 것으로 나타났다. 식생밀도가 작은 경우에는 식생영역에서 일정한 유속을 가지는 것으로 가정하는 2층모형의 적용성이 떨어지는 것으로 보이지만, 층평균된 유속을 산정함에 있어서는 2층모형이 3층모형에 비해 더욱 정확한 것으로 나타났다. 또한, 3층모형의 경우 2층모형과는 달리 경험상수에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

본 연구를 통하여 분석된 2층모형과 3층모형의 장/단점을 보완하여 수정 2층모형을 제시하였다. 수정 2층모형은 멱함수 형태의 레이놀즈응력 분포식을 이용하며, 기존의 2층모형과는 달리 식생영역에서 분포형의 평균유속을 예측한다. 개발된 수정 2층모형을 다양한 흐름 및 식생 조건에 대해 적용한 결과, 대부분의 경우에서는 기존 2층 및

3층모형에 비해 정확한 유속분포를 예측하는 것으로 나타났다. 식생밀도가 매우 작거나 이차흐름이 강한 경우에는 예측결과가 불량한 것으로 나타났다. 이는 수정 2층모형에서 가정해야만 하는 식생영역의 레이놀즈응력분포 형태와 식생영역의 혼합거리가 식생밀도와 이차흐름에 영향을 받기 때문이며, 추후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업 연구비지원 (06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 최성욱, 양원준, 박문형 (2003). “수심의 영향을 받는 침수 식생 개수로 흐름의 난류구조 및 고유구조.” **대한토목학회논문집**, 제23권, 제3-B호, pp. 165-174.
- Baptist, M.J. (2005). “Modelling floodplain biogeomorphology.” Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Choi, S.U., and Kang, H. (2004). “Reynolds stress modelling of vegetated open-channel flows.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, No. 1, pp. 3-11.
- Choi, S.U., and Yang, W. (2010). “Two-layer model for depth-limited open-channel flows with submerged vegetation.” *Journal of Hydraulic Research*, in press.
- Darby, S.E. (1999). “Effect of riparian vegetation on flow resistance and flood potential.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 5, pp. 443-454.
- Ghisalberti, M., and Nepf, H.M. (2002). “Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flow.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, No. C2, pp. 1-11.
- Ghisalberti, M., and Nepf, H.M. (2004). “The limited growth of vegetated shear layers.” *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 7.
- Ghisalberti, M., and Nepf, H.M. (2006). “The structure of the shear layer in flows over rigid and flexible canopies.” *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 6, pp. 277-301.
- Hoffmann, M.R., and Meer, F.M. (2002). “A simple space-time averaged porous media model for flow in densely vegetated channels.” *Computational Methods and Water Resources*, pp. 1661-1668.
- Huai, W.X., Zeng, Y.H., Xu, Z.G., and Yang, Z.H. (2009). “Three-layer model for vertical distribution in open channel flow with submerged rigid vegetation.” *Advances in Water Resources*, Vol. 32, No. 4, pp. 487-492.
- Huthoff, F., Augustijn, D.C.M., and Hulscher, S.J.M.H. (2007). “Analytical solution of the depth-averaged flow velocity in case of submerged rigid cylindrical vegetation.” *Water Resources Research*, Vol. 43, No. 6.
- Ikeda, S., and Kanazawa, M. (1996). “Three-dimensional organized vortices above flexible water plants.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 122, No. 11, pp. 634-640.
- Klopstra, D., Barneveld, H.J., Noortwijk, J.M., and Velzen, E.H. (1997). “Analytical model for hydraulic roughness of submerged vegetation.” Proc. 27th IAHR Congress, pp. 775-780.
- Kouwen, N., and Fathi-Moghadam, M. (2000). “Friction factors for coniferous trees along rivers.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No. 10, pp. 732-740.
- Lopez, F. (1997). “Open-channel flow with roughness elements of different spanwise aspect ratios: Turbulent structure and numerical modeling.” Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.
- Lopez, F., and Garcia, M. (1998). “Open-channel flow through simulated vegetation: suspended sediment transport modeling.” *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 9, pp. 2341-2352.
- Neary, V.S. (2003). “Numerical solution of fully developed flow with vegetative resistance.” *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 129, No. 5, pp. 558-563.
- 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.
- Poggi, D., Porporato, A., and Ridolfi, L. (2004). “The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence.” *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 111, pp. 565-587.
- Raupach, M.R. (1984). “A lagrangian analysis of scalar transfer in vegetation canopies.” *Journal of Royal Meteorological Society*, Vol. 113, No. 475, pp. 107-

- Ree, W.O., and Crow, F.R. (1977). "Friction factors for vegetated waterways of small slope." Technical Report Publication S-151 of U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- 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.
- Rowinski, P.M., and Kubrak, J. (2002). "A mixing-length model for predicting vertical velocity distribution in flow through emergent vegetation." *Hydrologic Science Journal*, Vol. 47, No. 6, pp. 893-904.
- Shimizu, Y., and Tsujimoto, T. (1994). "Numerical analysis of turbulent open-channel flow over a vegetation layer using a k-e turbulence model." *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 57-67.
- Stephan, U., and Gutknecht, D. (2002). "Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation." *Journal of Hydrology*, Vol. 269, pp. 27-43.
- Stone, B.M., and Shen, H.T. (2002). "Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 5, pp. 500-506.
- Thompson, G.T., and Robertson, J.A. (1976). "A theory of flow resistance for vegetated channels." *Transactions of ASAE*, Vol. 19, No. 2, pp. 288-293.
- Tsujimoto, T., and Kitamura, T. (1990). "Velocity profile of flow in vegetated bed channels." KHL progressive report1, Kanazawa University, Kanazawa, Japan.
- Velasco, D., Bateman, A., and DeMedian, V. (2008). "A new integrated, hydro-mechanical model applied to flexible vegetation in riverbeds." River, Coastal and Estuarine Morpho dynamics: RCEM2005, IL, U.S.A., pp. 217-227.
- Wilson, C.A.M.E., Stoesser, T., Bates, P.D., and Pinzen, A.B. (2003). "Open-channel flow through different forms of submerged flexible vegetation." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 11, pp. 847-853.
- Yang, W., and Choi, S.U. (2009). "Impact of stem flexibility on mean flow and turbulence structure in open-channel flows with submerged vegetation." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 47, No. 4, pp. 445-454.

논문번호: 10-028	접수: 2010.04.08
수정일자: 2010.08.12/08.25	심사완료: 2010.08.25