

침수식생 개수로의 레이놀즈응력분포를 이용한 2층모형 개선

Improvement of Two-layer Model using Reynolds Stress Distribution of Vegetated Open-channel Flows

양원준*, 최성욱**, 최병웅***, 배혜득****

Wonjun Yang, Sung-Uk Choi, Byungwoong Choi, Hyedeuk Bae

요 지

본 연구에서는 침수식생 개수로 흐름의 평균유속 및 다양한 난류량 예측이 가능한 해석적 모형의 비교 분석을 수행하였다. 각 모형의 비교분석에 사용한 수리실험자료는 기존의 다양한 연구자가 제시한 실험결과를 이용하였다. 레이놀즈응력의 경우, 상부영역에서는 선형분포를 가정한 두 모형 모두 수리실험자료와 잘 일치하였다. 그러나 식생영역의 경우 3층모형에서 가정한 지수함수 형태의 레이놀즈응력은 실험자료와 잘 일치하지 않는 것으로 나타났다. 평균유속의 경우, 삼층모형에서 새로이 추가된 내부식생영역은 전체적인 예측결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났지만, 전체적인 평균유속 예측결과는 두 모형 모두 비교적 유사하였다.

본 연구를 통하여 분석된 2층모형과 3층모형의 장점만을 취합하여 이층모형의 정확성을 개선하였다. 기존 수리실험자료를 이용하여 식생수로의 레이놀즈응력분포식을 최적화된 멱함수 형태로 제시하였다. 개발된 모형을 기존 수리실험자료에 적용한 결과 특정 조건을 제외하고는 비교적 정확하게 식생흐름의 평균유속분포를 예측하는 것으로 나타났으며, 이는 식생 및 흐름조건에 의해 식생영역의 레이놀즈응력분포형태가 왜곡되어있을 경우인 것으로 분석되었다.

핵심용어: 침수식생 개수로, 2층모형, 3층모형, 레이놀즈응력분포

1. 서론

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 침수 식생 개수로 흐름은 식생높이를 기준으로 상·하층의 흐름특성이 상이하고, 각층의 흐름은 식생밀도, 식생높이, 수심비와 같은 식생조건 및 유속, 수심, 하천 경사와 같은 흐름조건에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 복합적인 특성을 보이는 침수식생 흐름은 기존의 수심적분모형 (Manning 공식, Darcy-Weisbach 공식, Chezy 공식)을 사용할 경우 식생 하층영역에서는 평균유속의 과대 산정되거나 혹은 식생 상층 영역에서는 과소산정을 할 위험이 있다.

최근 까지 실제 하천환경에 식생이 미치는 영향을 파악하고자 하는 침수식생으로 인한 개수로 흐름의 조도계수 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

* 정회원 · 연세대학교 토목환경공학과 박사후 연구원 · E-mail: pulip1@gmail.com

** 정회원 · 연세대학교 토목환경공학과 교수 · E-mail: schoi@yonsei.ac.kr

*** 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 · E-mail: bw628@yonsei.ac.kr

**** 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 · E-mail: emr8517@yonsei.ac.kr

이용하여 해석적인 층평균된 유속 산정식을 개발하였고, 2층 모형의 적용성을 확인하였다. 또한, Klopstra 등 (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. 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 바닥전단유력이 영향을 미치는 범위에 따라 더욱 세분하는 3층모형 (Velasco et al., 2006; Huai et al., 2009)으로 구분할 수 있다. 각 유형의 모형에 대한 설명은 다음과 같다.

2.1 2층모형

침수식생 개수로 흐름은 식생층 (vegetated layer)과 그 위의 상층 (upper layer)으로 구분할 수 있다. 식생층은 식생으로 인해 발생하는 항력이 주된 저항요소인 영역으로서 유속의 크기는 상층에 비해 작은 편이며, 유속분포는 전 영역에 걸쳐 비교적 균일한 것으로 알려져 있다 (Tsujiimoto 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, log 형태의 유속 분포, 그리고 층간전단력에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

$$U_1 = \sqrt{\frac{2gHS}{aC_D h_1}} \quad \text{and} \quad \frac{u(z)}{U_1} = \frac{u_*}{U_1} \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{h_1}\right) + 1 \quad (1)$$

여기서 g 는 중력가속도, h_1 은 식생층 높이, S 는 수로 경사, U_1 는 식생영역 층평균유속, H 는 수심, a 는 식생밀도, C_D 는 식생의 항력계수, κ 는 von Karman 상수 (= 0.41), u_* 는 층간전단속도이다.

2.2 3층모형

Huai et al. (2009)은 수로 바닥의 조도를 고려하기 위하여, 침수식생 개수로의 식생영역을 내부 식생영역 (inner vegetated layer)과 외부 식생영역 (outer vegetated layer)으로 구분하였다. Huai et al.은 바닥에서 비활조건을 사용하여 내부 식생영역에서의 유속분포를 구하였고, 상부영역과 식생영역 사이 경계면에서의 전단속도를 이용하여 외부 식생영역 유속분포를 구하였다. 이렇게 구한 유속분포는 내부 및 외부 식생영역의 경계면에서 서로 일치할 때까지 반복계산을 수행하였다.

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

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left[1 + \frac{\kappa(z-h_1)}{l_0}\right] + \sqrt{\frac{2(\alpha h_2 + 1)}{C_D m D_v h_2}} \quad (3)$$

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

3. 모형 적용 및 분석

Fig.1(a)와 (b)는 식생의 밀도에 따른 2층 및 3층모형의 적용성을 살펴본 것이다. 각각 식생밀도가 5.0 m^{-1} 미만과 초과하는 경우에 해당하는 평균유속 분포이다. 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, 층평균된 유속을 산정함에 있어서는 2층모형의 정확도가 3층모형에 비해 더욱 높은 것으로 나타났다. 식생밀도가 커질 경우에는 식생영역의 수직방향 유속분포가 균일해지는 경향이 나타나고, 이때에는 2층모형의 유속분포 예측결과도 비교적 정확한 것으로 나타났다. 상부영역 평균유속분포 예측에 있어서는 두 모형의 우열을 판정하기 어려운 것으로 나타났지만, 층평균된 유속을 비교할 경우에는 2층모형이 3층모형에 비해 더욱 정확한 것으로 나타났다.

Fig.1(c)와 (d)는 수심비 (H/h_1)에 따른 두 모형의 적용성을 분석한 것이다. 식생영역에서의 예측결과를 보면, 수직방향 유속분포는 3층모형이 비교적 정확하게 예측하고 있는 것처럼 보이지만, 경계면에서의 유속이 과대 산정되는 것을 볼 수 있다. 2층모형의 경우에는 일정한 유속분포를 가정하였기 때문에 측정된 유속과는 차이가 있는 것처럼 보이며, 실제 층평균된 유속은 3층모형에 비해 더욱 정확하게 예측하는 것으로 나타났다. 상부영역은 두 모형 모두 경계면에서의 평균유속에 영향을 받기 때문에 측정자료와 잘 일치하지 않는 것으로 나타났지만, 층평균된 유속의 경우에는 2층모형이 측정값과 잘 일치하는 경향을 보이고 있다.

4. 2층모형의 개선

본 절에서는 기존의 2층모형과 3층모형의 장점을 취합하여 개선된 2층모형을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 다음과 같은 레이놀즈응력 분포식을 제안하였다.

$$-uw = u_*^2 \left(\frac{z}{h_1} \right)^n \quad \text{and} \quad -uw = u_*^2 \left(\frac{H}{h_2} - \frac{z}{h_2} \right); \quad \text{vegetation layer and upper layer (4)}$$

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. 위의 레이놀즈응력 분포식을 이용하여 다음과 같은 식생영역에서의 유속분포 식을 구할 수 있다.

$$u(z) = \sqrt{\frac{2gS}{aC_D} \left[\frac{2.5h_2}{h_1} \left(\frac{z}{h_1} \right)^{3/2} + 1 \right]} \quad \text{for vegetated layer} \quad (5a)$$

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left[1 + \frac{\kappa(z-h_1)}{l_o} \right] + \sqrt{\frac{2S}{aC_D} \left[\frac{2.5}{h_1} \left(\frac{z}{h_1} \right)^{3/2} + \frac{1}{h_2} \right]} \quad \text{for upper layer} \quad (5b)$$

Fig. 1은 위에 제시된 식(6a)와 식(6b)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 0.45 m와 0.35 m로서 수심비가 매우 큰 경우에 해당한다. 이 경우 수로 단면 전체에 걸쳐 2차흐름이 존재하며 이는 평균유속 분포에 크게 영향을 미칠 것으로 예상된다. Fig.8(b)는 Choi et al. (2003)에 제시된 실험 조건을 부여한 것으로 식생영역에서의 식생밀도가 1.5 m^{-1} 로 매우 작은 것이 특징이다. 식생밀도가 작은 침수식생 흐름에서는 식생영역의 레이놀즈응력 분포가 일반 개수로와 유사하여 멱함수 형태의 분포 (식(14a))와 큰 차이를 보일 것으로 예상된다. Fig.8(c)-Fig.8(f)는 앞의 적용사례와

비슷하게 식생밀도 및 수심비의 영향을 보기 위한 것이다. 식(15b)에서 경계면에서의 혼합거리 l_0 는 식생영역 크기의 10%를 사용하였다. 비교를 위하여 기존의 2층 및 3층모형에 의한 예측 결과도 함께 도시하였다.

5. 결론

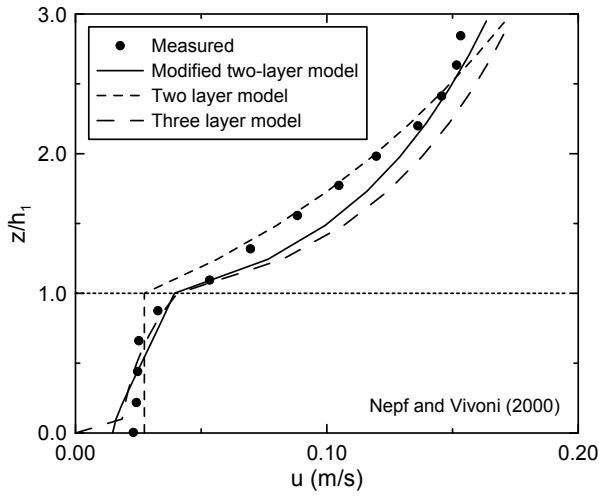
본 연구를 통하여 분석된 2층모형과 3층모형의 장/단점을 보완하여 수정 2층모형을 제시하였다. 수정 2층모형은 멱함수 형태의 레이놀즈응력 분포식을 이용하며, 기존의 2층모형과는 달리 식생영역에서 분포형의 평균유속을 예측한다. 개발된 수정 2층모형을 다양한 흐름 및 식생 조건에 대해 적용한 결과, 대부분의 경우에는 기존 2층 및 3층모형에 비해 정확한 유속분포를 예측하는 것으로 나타났지만, 식생밀도가 매우 작거나 이차흐름이 강한 경우에는 예측결과가 불량한 것으로 나타났다. 이는 수정 2층모형에서 가정해야만 하는 식생영역의 레이놀즈응력분포 형태와 식생영역의 혼합거리가 식생밀도와 이차흐름에 영향을 받기 때문이며, 추후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

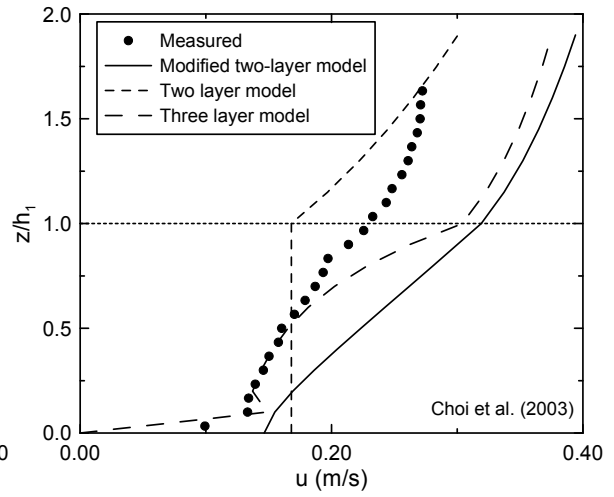
본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업 연구비지원 (06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

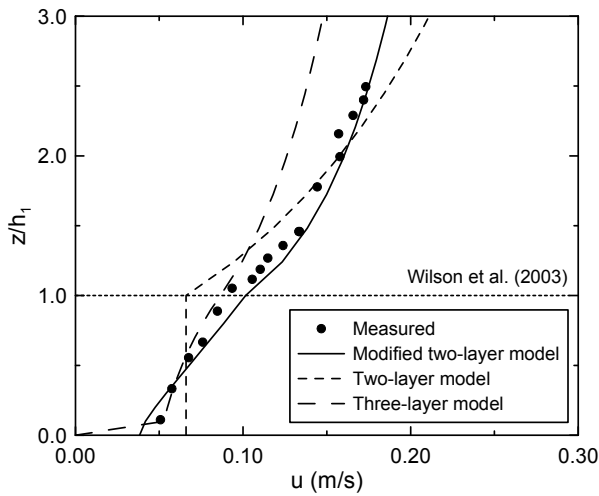
- 최성욱, 양원준, 박문형 (2003). "수심의 영향을 받는 침수식생 개수로 흐름의 난류구조 및 고유 구조." 대한토목학회논문집, 23(3-B), 165-174.
- Choi, S.U. and Kang, H. (2004). "Reynolds stress modelling of vegetated open-channel flows." *Journal of Hydraulic Research*, 42(1), 3-11.
- Huai, W.X., Zeng, Y.H., Xu, Z.G., and Yang, Z.H. (2009). "Three-layer model for vertical distribution in open channel flow with submerged rigid vegetation." *Advances in Water Resources*, 32(4), 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*, 43(6), W06413.
- Lopez, F. and Garcia, M. (1998). "Open-channel flow through simulated vegetation: suspended sediment transport modeling." *Water Resources Research*, 34(9), 2341-2352.
- Nepf, H.M. and Vivoni, E.R. (2000). "Flow structure in depth-limited, vegetated flow." *Journal of Geophysical Research*, AGU, 105(C12), 28547-28557.
- 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.
- 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*, 129(11), 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*, 47(4), 445-454.



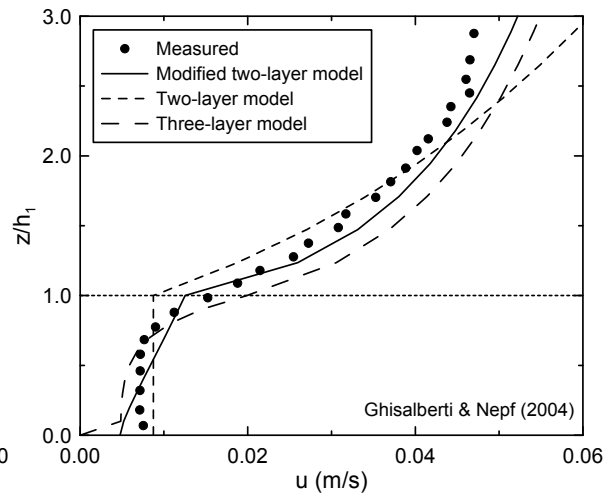
(a) for small aspect ratio



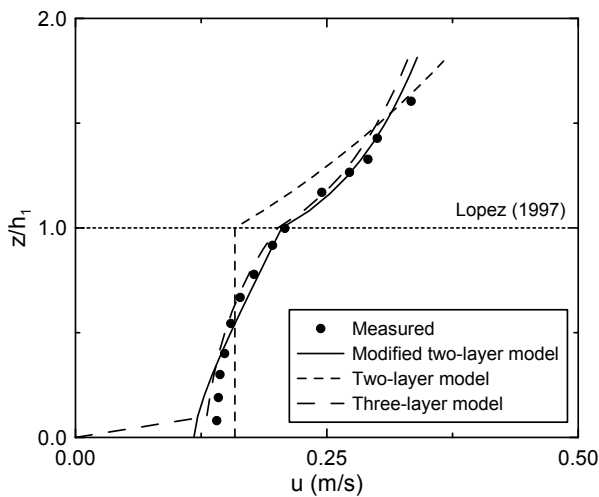
(b) for very low vegetation density



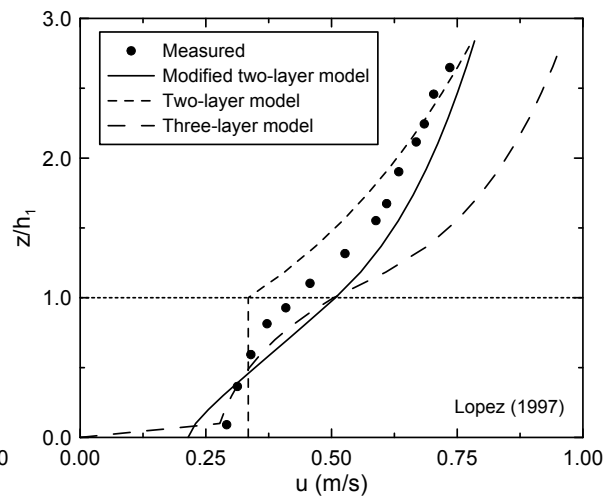
(c) for $a < 5.0 \text{ m}^{-1}$



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



(e) for $H/h_1 < 2.0$



(f) for $H/h_1 > 2.0$

Figure 8. Applications of modified two-layer model