

이층모형을 이용한 침수식생 개수로 흐름의 층별 평균 유속 산정

Estimating Layer-averaged Mean Velocity of Open-channel Flows with Submerged Vegetation

최성욱*, 양원준**
Sung-Uk Choi, Wonjun Yang

요 지

본 연구에서는 식생 하층 및 상층영역의 층평균 유속 및 유속 분포에 관련한 모형을 제시하였다. 제안된 모형을 정상류 흐름에 적용할 경우, 수심, 경사, 식생밀도, 식생높이와 같은 기본조건만을 이용하여, 각 층의 평균유속 뿐만 아니라 유속 분포를 산정할 수 있다. 모의 식생 및 레이저 도플러 유속계를 이용한 실내 수리실험을 수행하여 제안식의 적용성 및 정확성을 파악하였고, 기존 문헌 자료의 유속 및 식생 자료를 이용하여 범용성을 확인하였다. 분석 결과 본 연구에서 제시된 제안식이 비교적 정확하게 각 식생층의 평균유속을 산정하는 것으로 나타났으며, 식생조건 및 흐름조건의 변화에 따른 조도계수의 변화 양상에 대해 살펴보았다.

핵심용어 : 침수식생 개수로 흐름, 이층모형

1. 서론

식생된 개수로 흐름은 하천 수심과 식생높이의 비율에 따라 식생 피복 흐름 (terrestrial canopy flow), 침수 식생 흐름 (flow with submerged canopy), 정수 식생 흐름 (flow with 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 복합된 특성을 보이는 침수 식생 흐름은 기존의 1층모형 (Manning, Darcy Weisbach, Chezy 공식)을 사용할 경우 식생 하층영역에서는 평균유속의 과대산정되거나 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 (Tsujiimoto와 Kitamura, 1990; Ikeda와 Kanazawa, 1996); Nepf와 Vivoni, 2000; Ghisalbert와 Nepf, 2002; Wilson 등, 2003) 및 수치모의 (Shimizu와 Tsujimoto, 1994; Kujita와 Hong, 1996; Lopez와 Garcia, 1998; Neary, 2003; Choi와 Kang, 2004)가 대부분이었고, 침수식생으로 인한 개수로 흐름의 조도계수 또는 통수능 변화에 대한 관심은 비교적 작은 편이다. Ree와 Crow (1977), Kouwen과 Fathi-Maghadam (2000)은 식생으로 인한 바닥저항력 상승에 대한 경험식을 제시하였고, Stone과 Shen (2002), Huthoff 등 (2007)은 차원해석과 같은 방법을 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. 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 개발하고자 한다. 침수식생 개수로 흐름은 식생하부와 상부의 흐름 특성이 상이하기 때문에 기존의 2층 모형과 동일한 형태를 갖도록 하였다. 본 연구에서 제안한 모형을 검증하기 위해 레이저도플러유속계 (LDA)를 이용하여 다양한 흐름조건에 대한 수리실험을 실시하였고, 수집이 가능한 문헌자료에 대한 모형의 적용을 수행하여 모형의 정확성을 평가하였다.

* 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 · E-mail: schoi@yonsei.ac.kr

** 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 · E-mail: pulip@yonsei.ac.kr

2. 이중모형

침수식생 개수로 흐름은 그림 1에 도시한 것과 같이 상호간에 영향을 미치는 두 층 (vegetation layer와 upper layer)으로 구분할 수 있다. 그림의 식생영역은 식생으로 인해 발생하는 항력이 주된 저항요소인 영역으로서 유속의 크기는 상부영역에 비해 작은 편이며, 전 영역에 걸쳐 비교적 일정한 값을 갖는 것으로 알려져 있다 (Tsujiimoto와 Kitamura, 1990). 일반 개수로 흐름에서 중요시 되는 바닥 저항력은 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.

침수식생 개수로 흐름의 식생영역에서 힘의 평형을 고려하면, 중력, 바닥저항력, 식생항력, 그리고 층간 경계전단력 (interfacial shear stress)이 균형을 이루어야 하고, 이는 다음 식과 같다.

$$\tau_{h_1} + \rho g h_1 S = \rho C_b U_1^2 + \tau_v \quad (1)$$

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_{h_1} 은 경계전단력, 그리고 τ_v 는 식생항력이다. 경계전단력과 식생항력의 산정 방법을 식 (1)에 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. 식(2)에서 바닥 저항력을 무시하고, 식생영역 평균유속 (U_1)에 대해 정리하면 다음과 같은 산정식을 얻을 수 있다.

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

식(3)은 Stone and Shen (2002)와 Huthoff 등 (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, log 형태의 유속 분포를 보이지만, 기울기 및 시작점에 대해 다양한 값들을 갖는 것으로 나타나 있다 (Stenphan과 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 경계전단속도이다. 이를 상부영역 높이 (h_2)에 대해 적분하면, 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 유속이고, 본 연구에서는 식(3)과 식(5)를 이용하여 다음과 같은 침수식생개수로 흐름의 평균유속 산정식과 조도계수 산정식을 제안하고자 한다.

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

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

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

3. 모형의 적용

본 연구에서 제안한 식(3) - 식(7)을 검증하기 위해 침수식생 개수로 흐름에 대한 수리실험을 실시하였고, 문헌 조사를 통하여 얻은 다양한 조건의 수리실험에 대해 모형을 적용하여 산정값의 정확성을 평가하였다. 본 연구에서 수행한 수리실험은 3개의 수심비와 2개의 유량, 그리고 식생 유연성에 따른 2종류의 식생에 대한 7개의 실험 케이스이며, 모형의 정확성 평가에 사용한 기존 실험연구는 Ikeda와 Kanazawa (1996), Lopez와 Garcia (1998), Nepf and Vivoni (2000), Ghisalberti와 Nepf (2002), 그리고 Wilson 등 (2003)의 측정 자료를 이용하였다.

그림 2는 식생영역의 평균유속분포를 도시한 것이다. 가로축의 평균유속은 층평균 유속을 이용하여 무차원화 하였으며, 세로축은 식생높이를 이용하여 무차원화 하였다. 기호는 수리실험을 통해 측정된 유속분포이고, 실선은 층평균 유속이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 실험조건에 관계없이 대부분의 유속자료가 서로 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 식생영역에서의 평균유속분포는 경계면 근처를 제외하고는 비교적 일정

한 값을 가지고 있는 것을 볼 수 있으며, 이는 앞에서 언급한 것과 같이 식생영역의 유속분포를 수심방향에 대해 일정하다고 가정하여도 큰 무리가 없음을 알 수 있다.

그림 3은 식생영역 및 상부영역의 평균유속을 도시한 것이다. 상부영역에서의 유속분포가 하부영역과는 달리 여러 분포를 보이고 있는 것은, 앞에서 언급한 유속비, C_v ,가 유속분포 (log 분포의 기울기)에 영향을 미치기 때문이다. 유속비가 커지면 평균유속의 수직방향 변화율이 증가하고 유속비가 작아지면 감소하는 이같은 현상은 식생밀도 및 두 층간의 유속차에 영향을 받는 것으로 판단할 수 있으며, 이에 대한 자세한 내용은 Yang과 Choi (2008)에 제시되어 있다. 그러나, 그림에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 제안한 식(3)과 식(4)가 식생밀도, 식생높이, 수로경사, 수심만을 이용함에도 불구하고, 실험자료와 비교적 잘 일치하는 유속분포를 제시하는 것을 볼 수 있다.

그림 4는 식(3)과 식(5)를 이용하여 산정한 층평균 유속의 산정값을 실험자료를 적분하여 얻은 층평균 유속과 비교한 것이다. 그림에서 가로축은 실험자료를 이용하여 얻은 값이고, 세로축은 본 연구에서 제안한 모형을 이용하여 산정 유속이다. 그림 4(a)의 식생영역과 그림 4(b)의 상부영역 모두에서 식(3)과 식(5) 비교적 정확하게 평균유속을 예측하고 있는 것을 볼 수 있다. 그림 5는 식(6)을 이용하여 산정한 단면평균 유속과 Baptist (2005)에서 조사한 다양한 조건의 수리실험 및 현장관측 결과의 단면평균 유속을 비교한 것이다. 그림에서 가로축은 측정된 유속분포를 적분하여 얻은 단면평균 유속이고, 세로축은 식(6)을 이용하여 얻은 단면평균 유속이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 본 연구에서 제안한 식(6)이 약간의 과소추정을 하는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 식생영역의 높이를 식생높이와 동일한 것으로 가정하였기 때문인 것으로 판단되며, 유속분포를 알 수 있는 경우 기준면변위 (zero-plane displacement) 개념을 적용하여 식생영역의 높이를 산정하는 경우에는 매우 정확한 결과값을 보이고 있음을 그림 4에서 나타내었다.

그림 6은 식(7)을 이용하여 4가지의 수심비 및 다양한 유속비에 대한 식생수로의 조도계수 변화에 대해 도시한 것이다. 가로축에서 경계전단속도 (u_*)의 크기는 식생영역 층평균유속에 비해 작기 때문에 0-0.1의 범위를 갖고, 식생영역의 높이가 1인 것으로 가정하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 전반적으로 유속비가 증가하면, 조도계수가 증가하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 유속비의 증가는 두 층간의 유속차이가 증가하는 것을 의미하며, 이 경우 층간전단력이 증가하기 때문에 조도계수가 증가하는 것 또한 합리적인 결과인 것으로 판단된다. 그러나 수심비가 증가할 경우 (식생 침수비율의 증가) 유속비에 관계없이 조도계수가 일정해 지는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이는 수심이 증가할수록 식생영역이 전체 흐름에 미치는 영향이 감소하는 것을 나타내는 것으로서, 본 연구에서 제안한 모형이 합리적인 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 수심, 경사, 식생밀도, 식생높이와 같은 기본조건만을 이용하여 식생하층 및 상층영역의 층평균 유속 및 유속 분포를 산정할 수 있는 2층 모형을 제시하였다. 기존의 다양한 수리실험 자료 및 본 연구를 통해 측정된 유속분포를 이용하여 모형을 검증한 결과는 다음과 같다.

식생영역의 경우, 본 연구에서 제안한 산정식이 식생영역의 층평균 유속을 비교적 정확하게 산정하는 것을 확인하였다고, 이는 기존의 연구결과와 동일한 것이다. 그러나 식생영역의 높이가 식생높이와 동일하지 않은 경우에는 정확도가 다소 떨어지는 것으로 나타났으며, 기준면 변위 혹은 휘어진 식생높이 등을 고려할 수 있는 경우 더욱 정확한 산정값을 얻을 수 있는 것으로 판단된다. 상부영역의 경우, 식생이 log 분포의 기울기에 미치는 영향을 반영할 수 있는 분포식을 제안하였다. 수리실험을 통해 측정된 유속분포와 비교한 결과, 본 연구에서 제안한 분포식이 비교적 정확한 것을 확인하였다. 또한 모형을 적분하여 얻은 층평균 및 단면평균 유속의 경우에서도 간단한 입력자료를 이용함에도 불구하고 비교적 정확한 평균유속을 산정할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설기술혁신사업 (03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참고문헌

- 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 modeling of vegetated open-channel flows." *Journal of Hydraulic Research*, 42(1), 3-11.
- Ghisalberti, M. and Nepf, H.M. (2002). "Mixing layer and coherent structures in vegetated aquatic flows." *Journal of Geophysical Research*, 107(C2), 3_1-3_11.
- 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.
- Ikedo, S. and Kanazawa, M. (1996). "Three-dimensional organized vortices above flexible water plants." *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(11), 634-640.
- Klopstra, D.H.J., Barneveld, J.M., Noortwijk, J.M., and Velzen, E.H. (1997). "Analytical model for hydraulic roughness of submerged vegetation." *Proceedings of the 27th IAHR Congress*, SF, USA.
- Kouwen, N. and Fathi-Moghadam, M. (2000). "Friction factors for coniferous trees along rivers." *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(10), 732-740.
- Kujita, V. and Hong, H.T.M. (1996). "A numerical model for assessing the additional resistance to flow introduced by flexible vegetation." *Journal of Hydraulic Research*, 34(1), 99-114.
- Lopez, F. and Garcia, M.H. (1998). "Open-channel flow through simulated vegetation: suspended sediment transport modeling." *Water Resources Research*, 34(9), 2341-2352.
- Near, V.S. (2003). "Numerical simulation of fully-developed flow with vegetative resistance." *Journal of Engineering Mechanics*, 129, 558-563.
- Nepf, H.M. and Vivoni, E.R. (2000). "Turbulence structures in depth-limited, vegetated flow." *Journal of Geophysical Research*, 105(C12), 28547-28557.
- Ree, W.O. and Crow, F.R. (1977). "Friction factors for vegetated waterways of small slope." *Technical Report S151*, USDA, USA.
- Shimizu, Y. and Tsujimoto, T. (1994). "Numerical analysis of turbulent of open-channel flow over a vegetation layer using a k-ε turbulence model." *Journal of Hydro-science and Engineering*, 11(2), 57-67.
- Stephan, U. and Gutknecht, D. (2002). "Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation." *Journal of Hydrology*, 269, 27-43.
- Stone, B.M. and Shen, H.T. (2002). "Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness." *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5), 500-506.
- Tsujimoto, T. and Kitamura, T. (1990). "Velocity profile of flow in vegetated-ben channes." *KHL Profressive Report No. 1*, Kanazawa University, Japan.
- 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. (2007). "Impact of stem flexibility on mean flow and turbulence structure in open-channel flows with submerged vegetation." *Journal of Hydraulic Research*, (submitted).

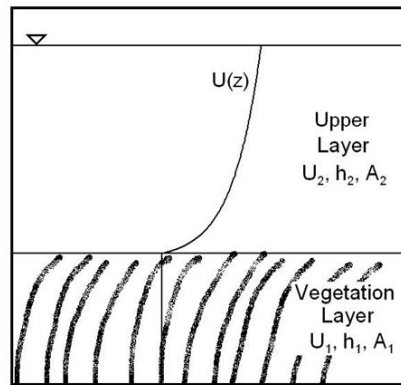


그림 1. 침수식생 개수로 흐름의 개략도

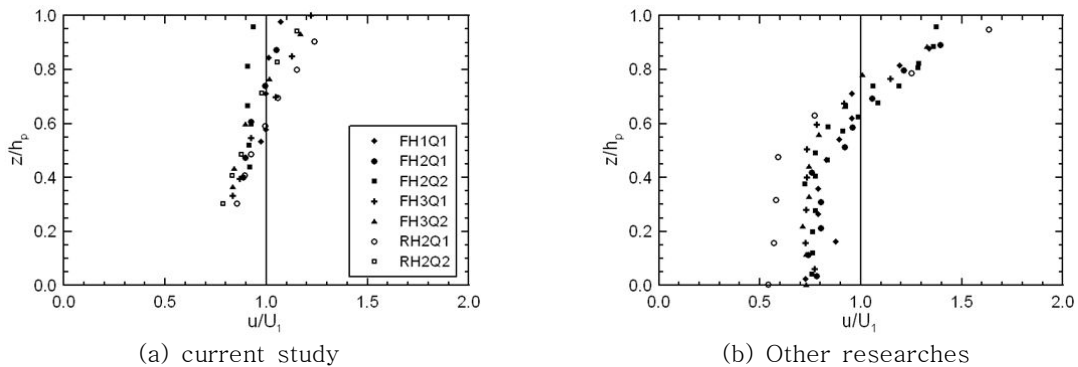
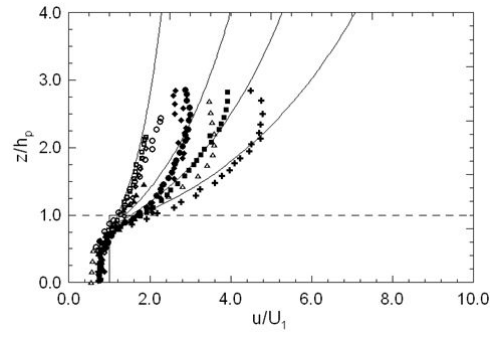
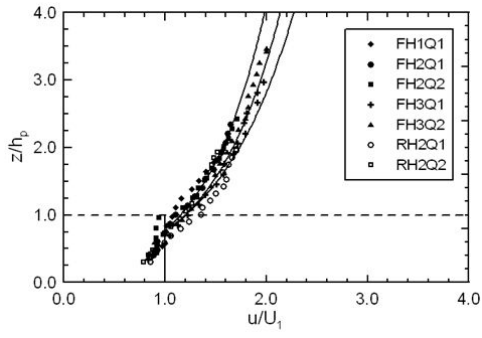


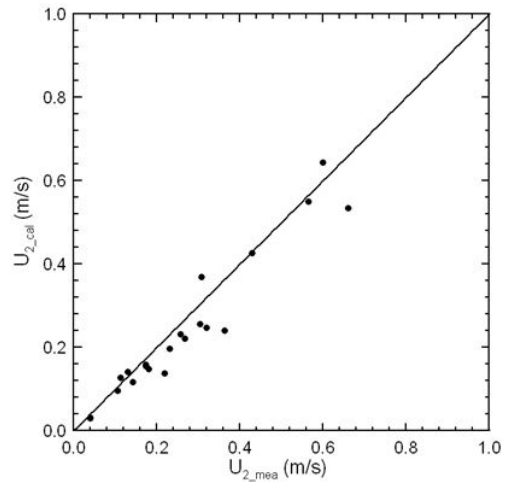
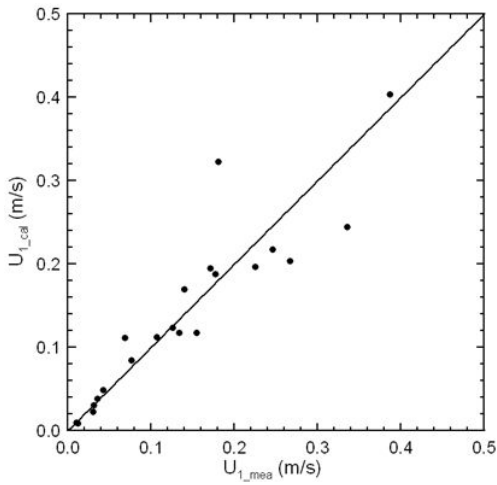
그림 2. 식생영역 무차원 평균유속분포



(a) current study

(b) Other researches

그림 3. 침수식생 개수로 흐름의 무차원 평균유속분포



(a) 식생영역

(b) 상부영역

그림 4. 층평균 유속의 비교

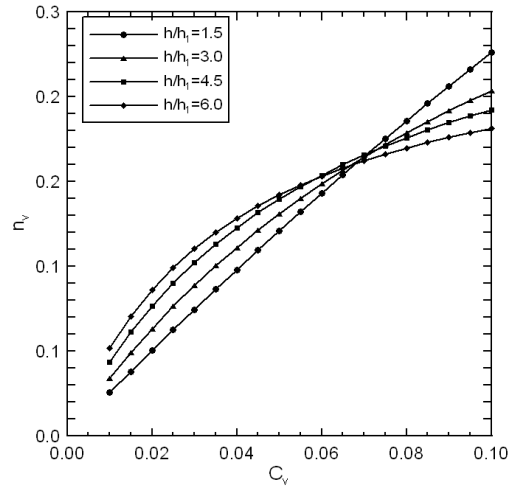
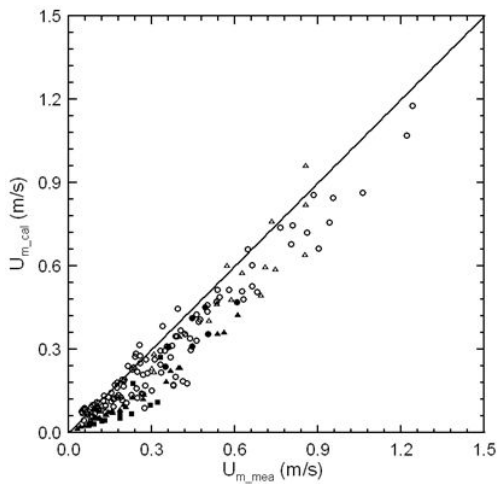


그림 5. 단면평균 유속의 비교

그림 6. 흐름 및 식생조건에 따른 조도계수의 변화