

침수식생 개수로의 부유사 농도분포 수리실험

Laboratory Experiments for Suspended Sediment Concentration of Open-channel Flows with Submerged Vegetation

양원준*, 최성욱**, 최병웅***

Wonjun Yang, Sung-Uk Choi, and Byungwoong Choi

요 지

하천 수질관리 및 하도관리에 있어 식생의 역할은 매우 중요하다. 식생된 개수로 흐름이 갖는 긍정적인 기능 중의 하나인 오염원의 여과 기능을 규명하기 위해서는 침수식생 개수로의 부유사 농도 분포에 관한 연구가 필요한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 침수식생 개수로의 평균흐름 및 난류구조에 대한 수리 실험을 실시하였고, 이를 바탕으로 하여 부유사 농도분포를 측정하였다. 유속 및 부유사 농도에 관한 측정자료를 이용하여 침수식생 개수로의 평균흐름, 난류 및 조직구조, 그리고 부유사 농도 분포의 특성에 대해 살펴보았다. 평균유속의 경우 식생높이 상부에서는 기존의 대수법칙과 유사한 형태를 나타내며, 레이놀즈 응력과 난류강도와 같은 난류구조는 식생높이 부근에서 최대값을 가지는 일반적인 형태를 갖는 것으로 분석되었다. 침수식생 개수로의 부유사 농도분포는 식생에 영향을 받는 것으로 나타났다. 일반 개수로 흐름에 비해 전 수심에 걸쳐 균일한 농도분포를 갖고 있음을 확인하였고, 식생높이 근처에서 부풀어 오르는 형태를 보였다.

핵심용어 : 침수식생, 개수로, 부유사, 수리실험

1. 서론

최근 생활수준의 향상으로 인해 자연환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 하천변의 자연 생태계 보전과 하천 수질오염 방지에 대한 노력이 점차 증가하고 있다. 1995년 말부터는 G-7 환경기술 개발의 일환으로 자연형 하천공법을 도입하여 기존의 콘크리트로 이루어진 저수호안을 식생 및 자연석과 같은 생물재료를 이용하여 대체하고 직선화된 저수로를 곡선화 하여 자연에 가깝게 복원시키는 노력들이 시도되고 있다. 자연형 하천공법에 대한 관심 증대와 함께 부각되고 있는 하도내 식생에 의한 흐름 특성 변화에 대한 연구는 미비한 실정이다. 특히 식생된 개수로 흐름이 갖는 긍정적인 기능 중의 하나인 오염원의 여과 기능을 규명하기 위해서는 식생된 개수로 흐름의 난류특성에 대한 이해가 선행되어야 한다. 그러나 지금까지 수행되어온 대부분의 연구는 침수식생 개수로 흐름의 평균유속 분포와 난류구조의 측정 (Tsumimoto와 Kitamura, 1990; Ikeda와 Kanazawa, 1996; Nepf와 Vivoni, 2000; Ghisalbert와 Nepf, 2002; Wilson 등, 2003) 및 수치모의 (Shimizu와 Tsumimoto, 1994; Kujita와 Hong, 1996; Lopez와 Garcia, 1998; Neary, 2003; Choi와 Kang, 2004)가 대부분이다.

앞에서 언급한 바와 같이 식생된 개수로에 관한 연구는 첨단 계측장비를 이용하여 식생 조건에 따라 평균흐름 및 난류구조의 변화에 대한 연구가 주를 이루었다. 그러나 이러한 평균흐름 및 난류구조의 변화는 오염물질이나 유사의 거동과 밀접한 관계가 있기 때문에, 최근 들어 식생이 유사의 퇴적에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되고 있다. Tollenr 등 (1982)은 폭 0.13 m, 길이 2.1 m의 수로에 실린더 모양의 끈은 정수 식생이 식재된 개수로 흐름에서의 유사 퇴적에 대한 연구를 수행하였다. Elliott (2000)은 폭 0.29 m, 길이 6 m 수로에 정수식생이 식재된 경우, 유사 퇴적 효과로 인한 식생수로에서의 부유사 감소 효율에 대한 연구를 수행하였고, Camp (1946)의 이론을 바탕으로 식생수로에서의 유사제거 효율성에 관한 실험식을 제시하였다. 그러나 Tollner 등 (1982)과 Elliott (2000)의 연구는 정수식생 수로에 대한 것이다. 실제 하천의 경우, 홍수시 침수식생 조건에 해당하게 되므로 이들의 연구결과를 실제 하천에 적용할 경우 부유사 퇴적량의 산정에 문제가 발생할 가능성이 높다. Yuuki와 Okabe (2002)는 끈은 식생흐름의 부유사 농도분포를 측정하였다. 수심 비가 약 2.0인 흐름에 대해 수리 실험을 수행하였으며, 침수식생 흐름의 경우 식생으로 인해 변형된 난류구조가 부유사 농도분포에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 그러나 이들의 수리실험은 비중이 일반 사질성 부유사와 크기는 비슷하지만, 수중단위중량이 작기 때문에 실제 하천에서의 부유사 거동을 보여준다고는 보기 힘든 문제점이 있다.

하도내 식생에 의한 개수로의 흐름구조 변화는 필연적으로 부유사의 거동특성을 변화시키며, 이는 최근 중요시되는 하천 수질관리 및 하도관리에 있어 매우 중요한 부분이다. 본 연구의 목표는 침수식생 조건을 갖는 개수로 흐름에서 부유사 농도 분포에 대한 수리학적 특성을 제시하는 것이다. 이를 위해 첨단 계측장비인 레이저 도플러 유속계 (LDA)를 이용하여 침수식생 조건을 갖는 개수로 흐름의 평균흐름 및 난류량에 관한 수리학적 특성을 분석하고, 부유사 농도분포를 측정하여 식생이 부유사 이동에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

* 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 박사후과정 · E-mail: pulip@yonsei.ac.kr

** 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 교수 · E-mail: schoi@yonsei.ac.kr (Ecoriver21사업단 4-4세부과제 연구책임자)

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

2. 실험조건

실제 하천의 식생은 서식조건 및 계절, 그리고 식생 종류에 따라 다양한 분포를 보이게 된다. 본 연구에서는 기존의 다양한 실험연구에 대하여 문헌조사를 수행하였으며, 문헌조사 결과 기존 연구에 적용된 식생밀도는 $0.082 \text{ m}^{-1} - 5.94 \text{ m}^{-1}$ 인 것으로 나타났다. 이같은 조사 결과를 바탕으로 하여, 단위면적당 약 1,400개의 식생을 식재하여 식생밀도가 약 2.75 m^{-1} 이 되도록 설정하였다. 수리실험 조건은 다음 표 1에 도시한 것과 같다. 동일한 수심을 갖는 흐름에 대하여 유량과 경사가 다른, 즉 레이놀즈 수가 서로 다른 흐름을 구성하였으며, 각각의 흐름에서 순간속도를 LDA를 이용하여 측정하였다. 유속측정이 끝난후 부유사 투입하였으며, 충분한 시간동안 (약 2시간) 순환시킨 후 부유사 농도를 측정하였다.

유속의 측정은 수로 끝단으로부터 1.5 m 떨어진 지점에서 실시하였다. 수로 중앙 지점에서 레이저 도플러 유속계를 이용하여 유속을 측정하였으며, 부유사 농도분포 또한 동일한 지점에서 수행하였다. 유속측정 시 동일 지점에서 100초간 유속을 측정하였고, 동일 높이의 주변 3개 지점에 대하여 유속을 측정한 후 측정값을 앙상블 평균 (ensemble averaging)하여 식생으로 인한 불균질성 (inhomogeneity)를 제거하였다. 부유사의 측정은 직경 0.005 m의 플라스틱 파이프를 통하여 부유사가 포함된 유수를 취수하였다 (그림 1참조). 부유사 농도의 측정 위치는 그림 2에 도시된 것과 같이 바닥으로부터 0.005 m 떨어진 지점에서부터 시작하여, 0.01 m 간격으로 구성하였다.

일반적으로 부유사 실험시에는 수로 상류단에서 일정량의 부유사를 지속적으로 투입하고, 하류단에 sediment trap을 만들어 수거하는 방식을 사용하지만, 이는 실험에 필요한 부유사의 총량 및 실험의 난이도를 어렵게 한다. 따라서 본 연구에서는 저수조에 일정량의 부유사를 투입한 후 계속해서 순환시키는 방법 (recirculating type)을 사용하였다. 수리실험에 사용한 부유사는 수중단위중량이 1.65이고, 크기는 체분석을 통하여 $D_{50} = 75 \mu\text{m}$ 인 일반 사질토를 사용하였다. 수리실험 시 부유사 농도의 결정은 예비실험을 통하여 소류사가 발생하지 않는 capacity 상태를 이루기 직전의 농도로 실험을 수행하였으며, 이때 부유사 농도는 0.14%이었다. 다음 그림 3은 실험에 부유사를 투입하였을 경우의 실험수로의 모습이다. 그림에서 볼 수 있듯이 바닥 근처에서 약간량의 부유사가 퇴적되어 있는 것을 볼 수 있으며, 부유사로 인하여 전체적인 유수의 색이 탁한 상태임을 알 수 있다.

3. 실험결과

그림 4는 바닥으로부터 거리에 따른 평균유속의 변화를 도시한 것으로서, 가로축은 기준면 변위로부터의 거리이고, 세로축은 유속이다. 실선은 대수법칙에 의한 유속분포를 나타내며, 기호는 실험을 통하여 측정된 유속이다. 세로축의 무차원화에 사용된 전단속도는 레이놀즈응력 분포를 사용하여 산정하였다. 식생높이보다 높은 구간에서는 일반적인 개수로의 유속분포와 유사한 대수분포 형태를 보인다. 그러나 식생높이 부근에서 속도경사가 커지며, 식생높이보다 낮은 구간에서는 바닥까지 선형적으로 감소하여 일반 개수로의 유속분포와 전혀 다른 양상을 나타내고 있다. 그림과 같이 식생높이 부근에서 속도경사가 커지는 것은 강한 전단층이 형성되기 때문으로 판단된다 (Nepf와 Vivoni, 2000; 강형식과 최성욱, 2000).

그림 5는 수심에 따른 레이놀즈응력 분포를 도시한 것이다. 가로축은 각 실험의 전단속도로 무차원화 하였으며, 세로축은 식생높이로 무차원화 하였다. 두 실험 경우 모두 식생높이 부근에서 레이놀즈응력이 최대값을 보이며 수면과 바닥, 양방향으로 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 식생높이 부근에서 발생하는 항력의 불연속에 의하여 강한 전단층이 형성되기 때문이다. 그림을 살펴보면 평균 유속이 대수법칙을 만족하는 식생높이 위부터는 선형분포를 보이는 것을 알 수 있다.

그림 6은 침수식생 개수로의 흐름방향과 수직방향 난류강도이다. 그림에서 볼 수 있듯이 식생높이 근처에서 난류강도가 최대값을 가지고 있으며, 바닥과 수면으로 갈수록 감소하는 것을 확인할 수 있다. Nepf와 Vivoni (2000)의 실험결과에 의하면 수직방향 난류강도는 흐름방향 난류강도의 약 50%인 것으로 알려져 있으며, 이 비율은 본 연구에서도 동일한 것으로 나타났다. 또한 수로의 평균유속이 다른 실험조건에 관계없이 유사한 형태로 무차원화 되는 것을 볼 수 있다.

본 연구에서는 표 1에 도시된 것과 같이 실험수로에 부유사를 투입하여, 침수식생 개수로 흐름의 부유사 농도분포를 측정하였다. 실험에 사용한 부유사의 평균 직경 (D_{50})은 $75 \mu\text{m}$ 이다. 부유입자의 특성치인 침강속도 (fall velocity)산정에 일반적으로 사용되는 Rubey의 식 (Rubey, 1993)은 부유사의 직경이 $100 \mu\text{m}$ 이상인 경우에 적용이 가능하기 때문에 다음과 같은 일반적인 침강속도의 이론식 (Stokes, 1581)을 이용하여 산정하였다.

$$w = \frac{1}{18} \cdot \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \cdot g \cdot \frac{d^2}{\nu} \quad (1)$$

여기서 γ_s , γ 는 부유사 입자와 물의 단위중량, g 는 중력가속도, d 는 입자의 직경, ν 는 물의 점성계수이다. 식(20)를 이용하여 산정된 $75 \mu\text{m}$ 사립자의 침강속도는 0.005058 m/s 이다. 그리고 식(3)에 사용되는 β 는 본 연구에서는 1로 가정하였다.

그림 7은 본 연구의 수리실험을 통해 측정된 부유사 농도 분포이다. 앞에서 언급한 것과 같은 직접 취수 방법을 이용하여 부유사 농도를 산정하였으며, 비교를 위해 일반 개수로에 적용하도록 되어있는 Rouse 분포를 동시에 도시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 침수식생 개수로 흐름의 부유사 농도분포가 전 수심에 걸쳐 균일하며, 유속이 빠른 RH2Q2-S 실험 조건의 경우 RH2Q1-S에 비해 부유사 농도분포가 더 높은 것으로 나타났다. 이는 평균유속이 빠른 경우 흐름 자체의 부유사 부상능력이 증대되기 때문이다. 각 실험조건에 대해서 Rouse 분포와 비교해보면, 침수식생이 부유사 농도분포에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 본 연구를 통해 측정된 부유사 농도 분포가 Rouse 분포에 비해 전 수심에 걸쳐 부유사 농도가

균일한 것을 확인할 수 있다. 또한 바닥 근처에서는 비교적 Rouse 분포와 유사한 값을 가지고 있는 것으로 나타났지만, 식생높이 근처에서부터는 부유사 농도분포가 Rouse 분포에 비해 더 큰 값을 보인다. 이 같은 측정된 농도의 분포 형태는 식생 영역과 비식생 영역간의 항력 불일치 (drag discontinuity)로 인해 발생하는 높은 수준의 난류 때문인 것으로 판단할 수 있으며, 일반 개수로 흐름에 식생이 존재할 경우에는 부유사 농도분포가 증가하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구의 목적은 침수식생 개수로의 부유사 농도 분포를 측정하는 것이다. 나무 막대를 이용하여 곧은 침수식생 개수로 흐름을 구현하였으며, 유입부의 영향이 없고 흐름이 잘 발달된 지점에서 2차원 LDA를 이용하여 유속을 측정하였다. 또한 침수식생이 부유사 농도분포에 미치는 영향을 분석하기 위하여 직경 75 μm , 비중 2.65인 일반 사질토 부유사를 이용한 수리실험 또한 수행하였다. 유속 및 부유사 농도에 관한 측정자료를 이용하여 침수식생 개수로의 평균흐름, 난류 및 조직구조, 그리고 부유사 농도 분포의 특성에 대해 살펴본 결과는 다음과 같다.

평균유속의 경우 식생높이 상부에서는 기존의 대수법칙과 유사한 형태를 나타내며, 식생높이 하부에서는 유속의 감소가 현저하게 발생하였다. 레이놀즈 응력과 난류강도는 식생높이 부근에서 최대값을 가지는 것으로 나타났으며, 수직방향의 난류강도는 흐름방향의 난류강도의 절반정도인 것으로 나타났다.

침수식생 개수로의 부유사 농도분포는 식생에 영향을 받는 것으로 나타났다. 일반 개수로 흐름에 비해 전 수심에 걸쳐 균일한 농도분포를 갖고 있음을 확인하였고, 식생높이 근처에서 부풀어 오르는 형태를 보였다. 또한, Rouse 분포는 침수식생 개수로의 부유사 농도분포를 정확하게 예측하지 못함을 확인하였다. 이는 식생으로 인해 발생하는 항력 불연속과, 식생높이 근처에서 발생하는 높은 수준의 난류 때문인 것으로 나타났다.

참고문헌

- 강형식, 최성욱 (2000) "식생된 개수로에서 난류구조와 부유사 이동 현상의 수치해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 33(5), 581-592.
- Camp, T.R. (1946). "Sedimentation and the design of sedimentation tanks." *Transactions of ASCE*, 111, 895-936.
- Choi, S.U. and Kang, H. (2004). "Reynolds stress modeling of vegetated open-channel flows." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 42(1), 3-11.
- Choi, S.U., Yang, W, and Park, M. (2002). "Turbulent Bursting-based model applied to prediction of suspended sediment concentration." *Proceedings of Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, Estes park, CO.
- Elliott, A.H. (2000). "Settling of fine sediment in a channel with emergent vegetation." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 126(8), 570-577.
- Ghisalberti, M. and Nepf, H.M. (2002). "Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows." *Journal of Geophysical Research*, AGU, 107(C2), 1-10.
- Ikeda, S. and Kanazawa, M. (1996). "Three-dimensional organized vortices above flexible water plants." *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(11), 634-640.
- Lopez, F. and Garcia, M. (1998). "Open channel flow through simulated vegetation: Suspended sediment transport modeling." *Water Resource Research*, AGU, 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.
- Shimizu, Y. and Tsujimoto, T. (1994). "Numerical analysis of turbulent open-channel flow a vegetation layer using a $k-\epsilon$ turbulence model." *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, 11(2), 57-67.
- Tollner, E.W., Barfield, B.J., and Haynes, J.C. (1982). "Sedimentology of erect vegetal filters." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 108(12), 1518-1531.
- Tusjimoto, T. and Kitamura, T. (1990). "Experimental study on open-channel flow with vegetated zone along sidewall: correlative structures of fluctuations of velocity and free surface." *KHL Progressive Report 1, Hydr. Lab.*, 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.
- Yuuki, T. and Okabe, T. (2002). "Experimental study on hydrodynamic structure of flow on vegetated riverbeds." *Proceedings of 12th APD-IAHR Congress*, Bangkok, Thailand, 311-319.

표 1. 수리실험 조건

Case	유량 (m^3/s)	수심 (m)	경사 (-)	식생고 (m)	Re (-)	D_{50} (μm)
RH2Q1S	0.0075	0.075	0.00151	0.035	16,667	75
RH2Q2S	0.0105	0.075	0.00266	0.035	23,333	75

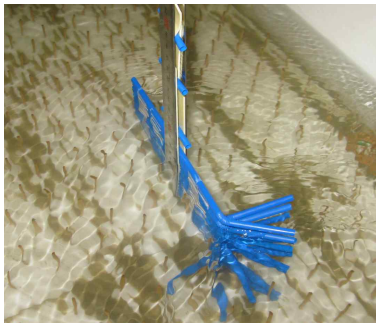


그림 1. 부유사 농도 장치

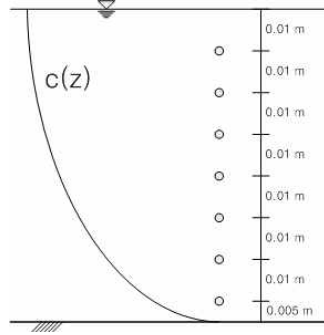


그림 2. 부유사 농도 측정 위치

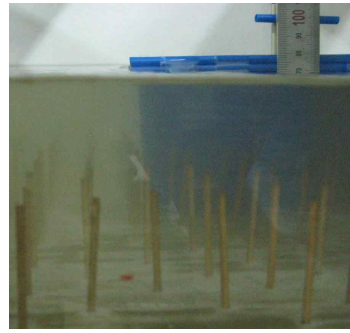


그림 3. 부유사 농도 측정 모습

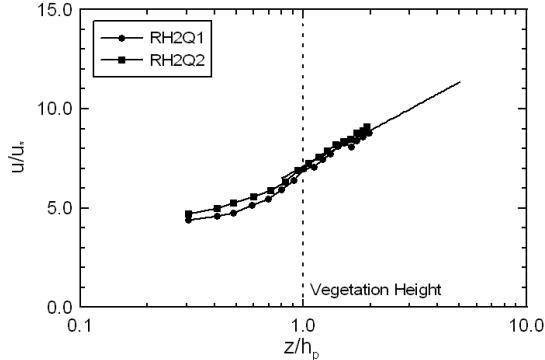


그림 4. 평균유속의 수직분포

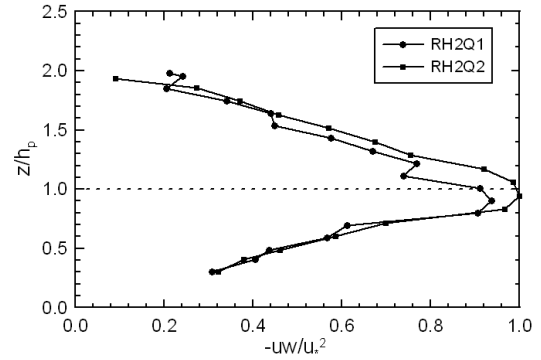
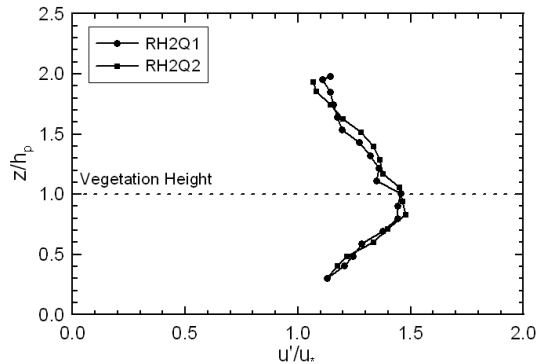
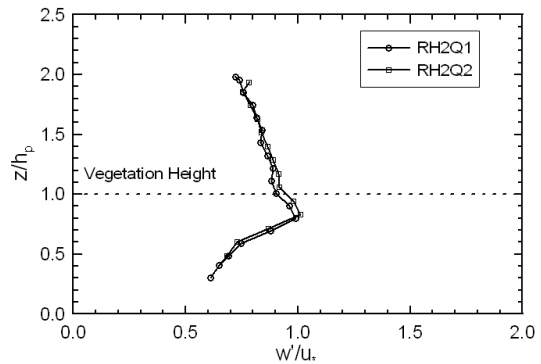


그림 5. 레이놀즈응력의 수직분포



(a) 흐름방향 난류강도



(b) 수직방향 난류강도

그림 6. 침수식생 개수로의 난류강도 수직분포

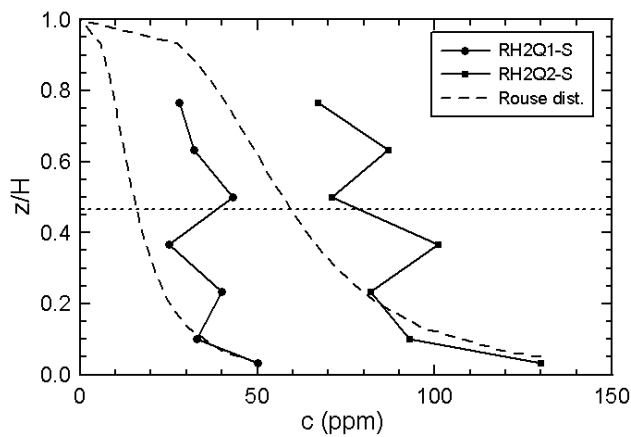


그림 7. 부유사 농도의 수직분포