

침수식생 개수로 단면특성의 실험연구

Experimental Research of Cross Section Characteristics of Open-channel flows over Submerged Vegetation

최성욱*, 양원준**

Sung-Uk Choi, Wonjun Yang

요지

본 논문은 수리실험을 통해 침수식생 개수로의 단면특성을 살펴보기 위해 하는 실험논문이다. 레이저 도플러 유속계를 이용하여 측벽으로부터의 거리에 따른 침수식생 개수로의 2차원 순간속도를 측정하였다. 측정된 유속자료를 이용하여, 평균유속, 레이놀즈응력, 난류강도를 살펴보았으며, 침수식생 개수로 흐름의 단면특성을 살펴보았다. 실험결과 침수식생 개수로는 기존의 일반적인 개수로 흐름과는 다른 단면 흐름특성을 보이는 것을 확인하였다. 특히 최대유속 발생지점이 수로 중앙이 아닌 측벽 근처로 이동하였으며, 이차흐름의 영향으로 인하여 흐름방향 등유속선의 물결형태와 레이놀즈응력 및 난류강도의 최대값 발생위치 이동과 같은 현상이 발생하는 것을 확인하였다.

핵심용어: 레이저 도플러 유속계, 단면특성, 이차흐름

1. 서 론

식생은 하천의 일반적인 흐름특성과 난류량을 변화시키기 때문에 부유사와 소류사 그리고 오염물질의 이송 및 확산에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Lopez와 Garcia, 2001). 하천 내 식생은 일차적으로 유수에 의한 항력을 유발하여 평균유속을 줄이며 통수능을 감소시켜 홍수시 수위를 증가시키기 때문에 하천 관리에 있어 역기능이 있다. 그러나 식생은 토사의 침식을 억제하여 하천수의 탁도를 경감시키고 오염물질을 여과하여 수질을 개선시키며 하도 내 수생동물의 서식처를 제공하여 수생 생태계 보존에 영향을 미치는 등의 순기능을 가지고 있다. 식생된 개수로 흐름에서 부유사의 퇴적, 유입, 이송 등은 흐름의 난류 특성에 지배적인 영향을 받는다. 따라서 식생된 개수로 흐름에서 부유사의 거동을 이해하기 위해서는 흐름의 난류 특성에 대한 연구가 선행되어야 한다.

침수식생 개수로 흐름을 살핀 기존 연구는 대부분 흐름의 수직구조와 유수와 연동하는 식생의 움직임에 집중되어왔다. Ikeda와 Kanazawa (1996)은 레이저 도플러 유속계 (LDA: Laser Doppler Anemometer)와 입자영상유속계 (PIV: Particle Image Velocimeter)를 이용하여 침수식생 개수로의 수직구조를 연구하였다. 그들은 분출 (ejection)과 쓸기 (sweep) 현상이 수반되는 식생높이 근처의 조직渦 (organized vortex)의 존재를 파악하였다. Tsujimoto (1996)는 부분식생 개수로의 유속을 LDA를 이용하여 측정하였고, 식생영역과 비식생영역간의 운동량 교환에 대한 연구를 수행하였다. Nepf와 Vivoni (2000)은 다양한 수심/식생고 조건의 개수로에서 평균흐름 및 난류구조의 수직분포를 연구하였으며, 특히 정수 (emergent)에서 침수 (submerged) 조건의 차이점 및 전환구조를 파악하는데 주력하였다. Ghisalberti와 Nepf (2002)는 침수식생 개수로 흐름이 혼합층

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

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

름 (mixing layer)과 유사한 것을 보여주었으며, 혼합층흐름의 경계면에서 발생하는 Kelvin-Helmholtz 涡의 특성에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 침수식생 개수로의 단면특성을 파악하기 위해 LDA를 이용한 수리 실험을 실시하였다. 연세대학교 수공학 연구실에서 보유하고 있는 LDA를 이용하여 2차원 유속을 측정하였으며, 측정결과를 이용하여 평균흐름과 난류량, 그리고 이차흐름 특성을 살펴보았다.

2. 레이저 도플러 유속계

난류 구조 파악에 사용되는 실험 기기는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 열선 유속계 (Hot Film Anemometer), 음파 도플러 유속계 (ADV: Acoustic Doppler Velocimeter), 레이저 도플러 유속계와 같이 한 지점의 속도 성분을 측정하는 방법과 입자 영상 유속계와 입자 추적 유속계 (PTV: Particle Tracking Velocimetry)를 사용하여 전체적인 흐름장을 가시화 하는 방법 (Flow Visualization)이 있다. 한 지점의 속도 성분을 측정하는 방법은 난류 구조의 정량적인 해석에는 장점이 있으나 난류의 공간적인 연관 문제를 해석함에 어려움이 있고, 흐름장을 가시화 하는 방법은 난류 흐름의 공간적인 연관 문제를 해석하는데 효과적이지만 짧은 순간에 변화하는 난류의 특성을 파악하여 정량적인 분석을 하는데 기술적인 한계가 있다.

개수로에서의 난류구조 연구에 있어서 열선 유속계 혹은 음파 도플러 유속계를 이용할 경우, 흐름장 내부에 유속 측정기기를 장치하여야만 한다. 그러나 흐름장 내부에 장치된 유속 측정기는 유속을 측정하기 위한 탐침이 흐름장을 교란시키기 때문에 정확한 유속을 측정하기 곤란하다. 그러나 레이저 도플러 유속계의 경우 개수로 흐름 외부에서 레이저를 조사하여 유속을 측정하기 때문에 흐름장을 교란시키지 않고 유속 측정이 가능하다. 음파 도플러 유속계 및 열선 유속계는 측정 부피가 레이저 도플러 유속계에 비하여 매우 크기 때문에 수심이 작은 흐름에서 유속의 수직분포를 측정하기 어렵다. 또한 바닥 근처, 수면 근처에서 유속을 측정하기 어려우며 개수로 흐름 내부에 구조물이 위치할 경우 구조물 근처에서의 유속을 측정하는 것이 쉽지 않다. 그러나 레이저 도플러 유속계의 경우 측정 부피가 매우 작고 레이저를 조사하는 방향을 제어할 수 있기 때문에 앞에서 언급한 문제들이 유속 측정에 있어 크게 영향을 미치지 못한다.

3. 실험조건

본 연구는 연세대학교 수공학연구실이 보유하고 있는 가변 경사식 개수로 실험장치를 이용하였다. 개수로 실험장치의 재원은 폭 0.45 m, 높이 0.5 m, 그리고 길이 8.0 m이다. 표 1에 도시한 것과 같이 동일한 수심에 대하여 유량을 서로 다르게 하여 실험조건을 구성하였으며, U_m 은 단면평균유속, Re 는 Reynolds 수, 그리고 S 는 바닥 경사이다. 모형 식생은 웨어에서 하류방향으로 4.0 m 지점부터 7.5 m 지점까지 총 3.5 m의 구간에 식재하였다. 그림 1에 도시된 것과 같이 길이 35.0 mm, 폭 2.0 mm의 폴리에틸렌 필름을 이용하여 개수로 실험 장치에 유연한 식생을 구현하였으며, 식생밀도는 1.375 m^{-1} 로 설정하였다.

본 연구는 침수식생 개수로의 단면 흐름 특성을 살펴보기 위한 것으로써, 전체 단면에 대한 유속측정이 필요하다. 그림 2에 도시된 지점에서 유속 측정을 수행하였으며, 총 유속측정지점의 수는 147이다.

4. 측정결과

그림 3은 횡방향 지점별 평균유속을 도시한 것이다. 측벽으로부터의 거리에 관계없이 식생높이 상부에서의 유속분포는 일반 개수로 흐름과 매우 유사한 것을 알 수 있으며, 식생높이 하부에서는 일정한 것으로 나타났다. 평균유속의 변곡점 (inflection point)은 휘어진 식생높이에서 나타났으며, 이는 기존 Ikeda와 Kanazawa (1996), Raupach와 Thom (1981)의 결과와 동일하다. 그러나 측벽 근처에서 평균유속이 감소할 것으로 예상하였지만, $y/B = 0.02$ 지점의 평균유속이 다른 지점에 비해 크게 나타났다. 이는 이차흐름의 영향이 적은 수로 중앙에서 최대 유속이 발생하는 것으로 알려진 기존의 이론과는 다른 것이다.

그림 4는 흐름방향 평균유속의 등고선도이며, 그림에서 이차흐름을 도시한 것은 평균유속 분포를 이용하여 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대유속 발생지점이 수로 중앙이 아닌 측벽 근처 ($y/B = 0.05$)와 $y/B = 0.35$ 의 수면 근처에서 발생하고 있다. 또한 등유속선이 횡방향으로 물결모양을 이루고 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 상승류와 하강류의 반복과 최대유속점의 이동은 Kang과 Choi (2007)의 수치모의에서도 동일한 현상이 보고되었다.

그림 5는 레이놀즈 응력의 횡방향 지점별 수직분포를 도시한 것이다. 일반적으로 레이놀즈 응력은 바닥에서부터 증가하기 시작하여, 식생높이 근처에서 최대값을 가진 후 수면방향으로 감소하는 것으로 알려져 있다. 그림에서 최대 레이놀즈 응력은 휘어진 식생높이 근처에서 발생하였지만, $y/B = 0.16$ 인 지점에선 식생높이 상부에서 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 레이놀즈 응력의 분포형상이 이차흐름으로 인한 상승류의 영향을 받기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 또한 R2Q2 케이스의 경우 측벽 근처 ($y/B = 0.02$)에서 레이놀즈 응력의 부호가 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 이는 수면 근처에서 발생하는 유속감쇄 (velocity dip) 현상 때문인 것으로 판단할 수 있다.

그림 6은 난류강도를 도시한 것이다. 난류강도의 분포형태는 레이놀즈 응력과 유사하게 식생높이 근처에서 최대값을 가지고, 수면과 바닥방향으로 감소하는 형태를 보인다. 레이놀즈 응력과는 다르게 실제 식생높이보다 높은 지점에서 난류강도의 최대값이 나타나고 있으며, 이는 $y/B = 0.15$ 인 지점에서 확인할 수 있다. 이는 이차흐름으로 인해 발생한 상승류에 난류강도가 직접적인 영향을 받기 때문인 것으로 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 침수식생 개수로 흐름의 단면특성에 관한 실험연구이다. 폭 0.002 m, 길이 0.035 m인 폴리에틸렌 필름을 이용하여 유연한 식생을 모사하였으며, 동일 수심에 대하여 2가지의 유량을 적용시켜 수리 실험을 수행하였다. 유입부의 영향이 없고, 흐름이 잘 발달된 지점에서 유속측정을 실시하였으며, LDA를 이용하여 각 지점에서의 순간속도를 측정하였다. 바닥 및 측벽으로부터의 거리에 따른 평균유속, 레이놀즈응력, 난류강도와 같은 난류량을 살펴보았다.

측정된 횡방향 지점별 평균유속은 기존 연구결과와 유사하였다. 그러나 최대 유속 발생지점이 수로 중앙이 아닌 측벽 근처로 이동하였고, 등유속선의 형태가 물결모양으로 나타났다. 이는 기존에 알려진 개수로 흐름과는 다른 것으로 판단할 수 있으며, 이와 같은 현상의 발생 원인은 침수식생으로 인한 이차흐름 때문인 것으로 판단할 수 있다. 레이놀즈응력 및 난류강도의 경우도 평균유속과 유사한 결과를 보이는 것을 확인하였다. 식생높이 근처에서 최대값을 가지고, 수면 및 바닥에 가까워질수록 감소하는 것은 일반적인 식생수로와 동일하였지만, 이차흐름의 영향을 받아 최대값 발생위치가 식생높이 상부로 이동하는 현상이 관찰되었다.

감사의 글

본 연구(보고서)는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참고문헌

1. Ghisalberti, M. and Nepf, H.M. (2002). "Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows." *Journal of Geophysical Research*, AGU, 107(C2), 3-1~3-11
2. Ikeda, S. and Kanazawa, M. (1996). "Three-dimensional organized vortices above flexible water plants." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 122(11), 634~640.
3. Kang, H. and Choi, S.-U. (2007). "Numerical Investigations of Streamwise Vortex in Fully Vegetated Open-Channel Flows." submitted to Journal of KSCE (in Korean).
4. Lopez, F. and Garcia, M. (2001). "Mean flow and turbulence structure of open-channel flow through non-emergent vegetation." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 127(5), 392~402.
5. Nepf, H.M. and Vivoni, E.R. (2000). "Flow structure in depth-limited, vegetated flow." *Journal of Geophysical Research*, AGU, 105(C12), 28547~28557.
6. Raupach, M.R. and Thom, A.S. (1981). "Turbulence in and above plant canopies." *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 13, 97~129.
7. Tsujimoto, T. (1996). "Coherent fluctuations in a vegetated zone of open-channel flow: causes of bedload lateral transport and sorting." *Coherent Flow Structures in Open Channels*, John Wiley & Sons Ltd.

표 1. 실험 조건

Case	q (CMS)	Um(m/s)	h (m)	hp_def. (m)	A _{RC}	H _{RV}	Re (-)	S (-)
R2Q1	0.0075	0.22	0.075	0.025~0.030	6.0	2.1	16,500	0.0002
R2Q2	0.0105	0.31	0.075	0.020~0.030	6.0	3.0	34,100	0.0001

h_{p_def.}: deformed vegetation height

A_{RC}: aspect ratio of channel (B/h)

H_{RV}: flow depth to vegetation height ratio (h/h_{p_def.})

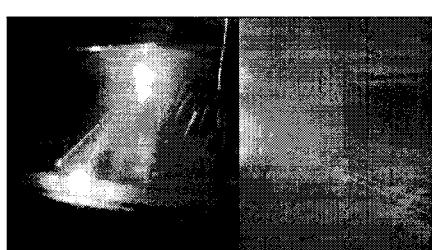


그림 1. 수리실험 사진

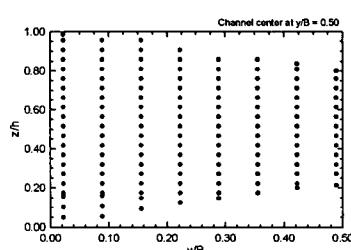


그림 2. 측정 지점

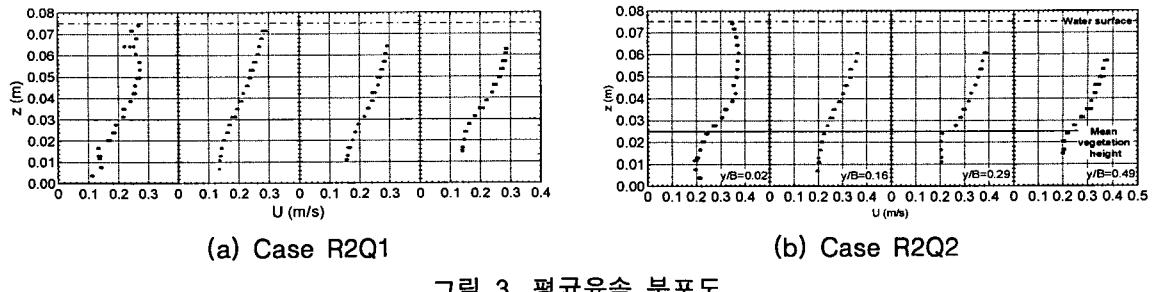


그림 3. 평균유속 분포도

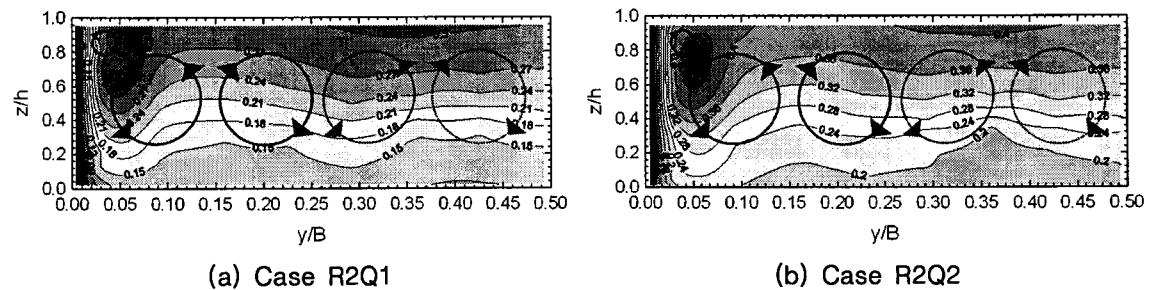


그림 4. 평균유속 등고선도

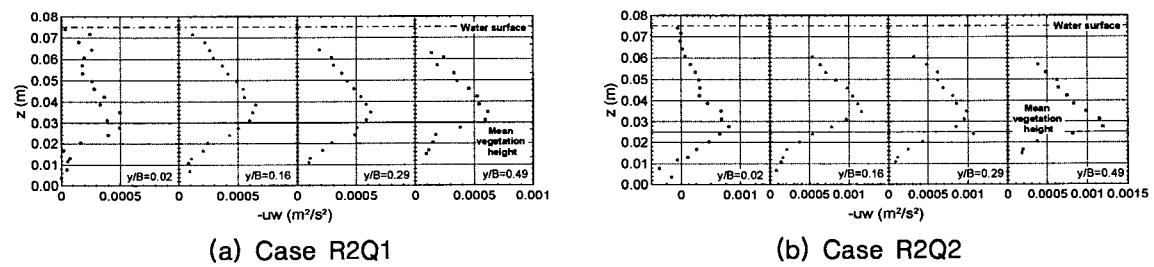


그림 5. 레이놀즈응력 분포

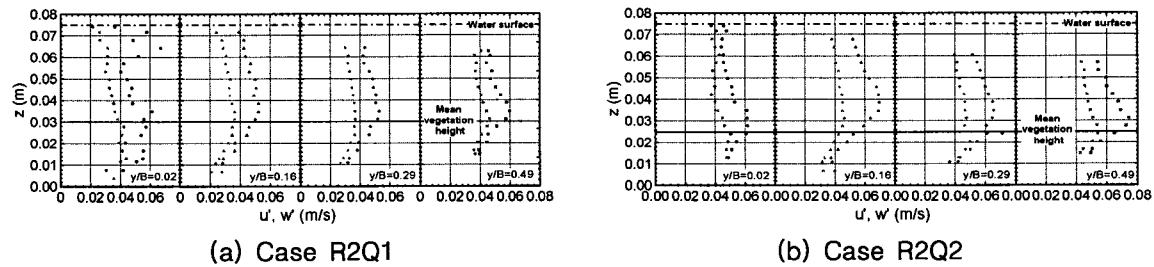


그림 6. 난류강도 분포