

레이저 도플러 유속계를 이용한 식생된 개수로의 난류측정

Measurement of Turbulent Structure of Open-Channel Flows with Submerged Vegetation

최성욱¹⁾, 양원준²⁾

Choi, Sung-Uk · Yang, Won Jun

1. 서론

식생은 하천의 일반적인 흐름특성과 난류량을 변화시키기 때문에 부유사와 소류사 그리고 오염물질의 이송 및 확산에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Lopez와 Garcia, 1998). 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.

본 연구에서는 연세대학교 수공학 연구실에서 보유하고 있는 레이저 도플러 유속계(LDA: Laser Doppler Anemometer)에 의한 유속 측정 결과를 살펴보고자 한다. 레이저 도플러 유속계의 측정 속도는 최대 180 MHz이며, 측정부피는 약 0.00015 cm^3 , 300 mW의 아르곤-이온 레이저를 사용하여 식생된 개수로의 2차원 유속을 측정하였고, 측정결과를 음파도플러 유속계(ADV: Accoustic Doppler Velocimeter)에 의한 측정결과와 비교하였다. 두 기기의 측정결과를 비교함으로써 레이저 도플러 유속계의 적용성을 파악하였다.

2. 레이저 도플러 유속계

난류 구조 파악에 사용되는 실험 기기는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 열선 유속계(Hot Film Anemometer), 음파 도플러 유속계, 레이저 도플러 유속계와 같이 한 지점의 속도 성분을 측정하는 방법과 입자 영상 유속계(PIV: Particle Image Velocimetry)와 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 측정기기는 유속을 측정하기 위한 탐침이 흐름장을 교란시키기 때문에 정확한 유속

1) 부교수, 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목·환경공학전공 (e-mail: schoi@yonsei.ac.kr)

2) 박사과정, 연세대학교 대학원 토목공학과 (e-mail: pulip@yonsei.ac.kr)

을 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 0.9 m, 높이 0.6 m, 그리고 길이 12 m이며, 바닥 경사는 0.0016으로 설정하였다. 모형 식생은 웨어에서 하류방향으로 4.5 m 지점부터 9.5 m 지점까지 총 5 m의 구간에 식재하였다. 길이 100 mm, 직경 5 mm의 플라스틱 실린더를 이용하여 개수로 실험 장치에 식생을 구현하였으며, 1 m² 당 100 주의 모형 식생을 식재하였다.

유량은 저수조에서 급수조로 공급되어 개수로를 통하여 흐른 후 유출수조를 거쳐 다시 저류조로 집수된다. 유량의 관측은 개수로의 상단부에 설치된 높이 0.4 m의 아크릴 사각 예연웨어를 이용하였다. 수심관측은 식생 구간의 상·하류부와 중앙에서 실시하여 식생 구간의 수심 변화를 관찰하였다. 실험에서 단위폭당 유량 (q)과 식생구간의 수심 (H)은 각각 0.06 m²/sec와 0.25 m로 설정하였다. 본 연구에서 적용한 실험조건은 표 1과 같다. 표에서 U_m 은 단면평균유속, Re 는 Reynolds 수, Fr 은 Froude 수, 그리고 S_0 는 바닥 경사이다. 좌표축은 주흐름방향, 횡방향 그리고 하상의 수직방향을 각각 x , y , z 축으로 설정하였다. 측정결과와 용이한 비교를 위하여 그림 1과 같이 동일한 지점에서 측정을 하였으며, 측정된 자료의 신뢰성을 확인하기 위해서 LDA는 한 지점당 100초씩 측정하여 약 8,000 개의 자료(측정속도 약 80 Hz)를 획득하였으며, ADV는 120초씩 측정하여 3,000 개의 자료(측정속도 25 Hz)를 획득하였다.

4. 측정결과

그림 2는 바닥으로부터의 거리에 따른 평균유속의 변화를 도시한 것이다. 식생높이보다 높은 구간에서는 일반적인 개수로의 유속분포와 유사한 형태를 보이는 것으로 판단된다. 그러나 식생높이보다 낮은 구간에서는 식생이 존재하지 않는 개수로 흐름의 유속분포와 전혀 다른 양상을 보이고 있다. 이것은 기존 강형식과 최성욱 (2000), Nepf와 Vivoni (1999) 등의 연구결과와 동일한 것이다. LDA와 ADV의 측정결과를 살펴보면 동일한 흐름에 대하여 LDA가 더욱 세밀하게 측정이 가능하며, 특히 수면근처와 바닥근처에서의 유속분포를 조밀하게 측정할수 있음을 확인하였다.

그림 3은 레이놀즈 응력의 수심방향 변화를 도시한 것이다. 식생높이 부근에서 레이놀즈 응력이 최대값을 형성하며 수면과 바닥 양 방향으로 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 식생높이 부근에서 레이놀즈 응력의 최대값이 형성되는 이유는 식생높이 부근에서 강한 전단층이 형성되기 때문으로 알려져 있다 (Nepf와 Vivoni, 2000).

그림 4와 그림 5는 흐름방향과 수직방향의 난류강도 (u' , w')을 도시한 것이다. 식

생높이 부근에서 난류강도가 모두 최대값을 나타내고 있으며, 바닥과 수면으로 가까워 질수록 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 전 수심에 대하여 수직방향 난류강도가 흐름방향 난류강도의 절반정도로 나타났다. 레이놀즈 응력과 난류강도 모두 평균유속의 경우와 동일하게 LDA가 ADV에 비하여 수심 근처에서는 약 0.05 m, 바닥 근처에서는 약 0.02 m 정도 더 측정이 가능한 것으로 나타났다. 그리고 그림 4의 레이놀즈 응력과 그림 6의 수직방향 난류강도의 경우 LDA와 ADV의 측정결과가 약간 다르게 나타났다. 이것은 ADV에 의해 측정지점 주변의 흐름이 교란되었기 때문으로 판단되며, LDA의 경우에는 이러한 흐름 교란이 발생하지 않기 때문에 더욱 정확한 측정치를 보여주는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 연세대학교 수공학 연구실이 보유하고 있는 2차원 LDA를 이용하여 식생된 개수로의 유속을 측정하였다. 플라스틱 실린더를 이용하여 식생된 개수로 흐름을 구현하였으며, 유입부의 영향이 없고 흐름이 잘 발달된 지점에서 LDA를 사용하여 유속을 측정하였다. 바닥으로부터 거리에 따른 평균유속과 레이놀즈 응력, 난류 강도를 ADV에 의한 측정결과와 비교하여, LDA의 적용성을 파악하였다.

평균유속의 경우 식생높이 상부에서는 기존의 대수법칙과 유사한 형태를 나타내며, 식생높이 하부에서는 식생이 없는 개수로 흐름과는 전혀 다른 양상을 나타내고 있음을 확인하였다. 이는 기존의 연구결과와 동일한 것으로 확인하였으며, ADV에 의한 측정결과 또한 동일하였다. 레이놀즈 응력과 난류강도 또한 식생높이에서 최대값을 가지며, 수심과 바닥에 가까워 질수록 감소하는 형태를 나타내었으며, ADV와 유사한 결과를 나타내었다. 그러나 수직방향 난류강도와 레이놀즈 응력은 LDA에 의한 측정값과 ADV에 의한 측정값이 약간 다르게 나타났다. 이것은 ADV에 의해서 측정지점 주변의 흐름이 교란되기 때문인 것으로 판단된다. LDA는 ADV로는 측정하기 어려운 수면근처와 바닥 근처에서의 정밀한 유속측정이 가능하다. 이것은 LDA의 측정부피가 작기 때문인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설기술연구개발사업(과제번호: 22-02)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 강형식, 최성욱 (2000). "식생된 개수로에서 난류 구조와 부유사 이동 현상의 수치해석." 한국수자원학회논문집, 33(5), 581-592.
- Lopez, F. and Garcia, M. (1998). "Open-channel flow through simulated vegetation: Suspended sediment transport modeling." *Water Resources Research*, AGU, 34(9), 2341-2352.
- Nepf, H.M. and Vivoni, E.R. (1999). "Turbulence structure in depth-limited, vegetated flow: Transition between emergent and submerged regimes." *28th IAHR congress*, Graz, Austria.
- Nepf, H.M. and Vivoni, E.R. (2000). "Flow structure in depth-limited, vegetated flow." *Journal of Geophysical Research*, AGU, 105(C12), 28547-28557.

표 1 실험 조건

q (m ² /sec)	H (m)	U_m (m/sec)	Re	Fr	S_0
0.06	0.25	0.20	50,000	0.13	0.0016

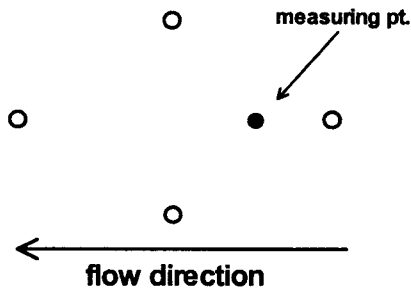


그림 1 LDA와 ADV의 측정지점

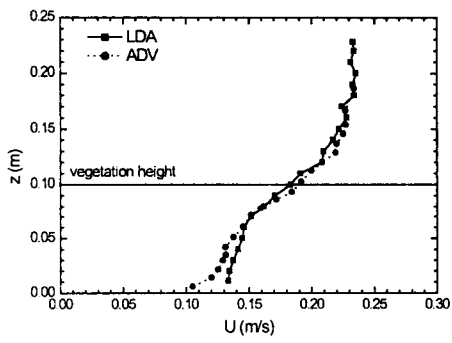


그림 2 수직방향 평균유속

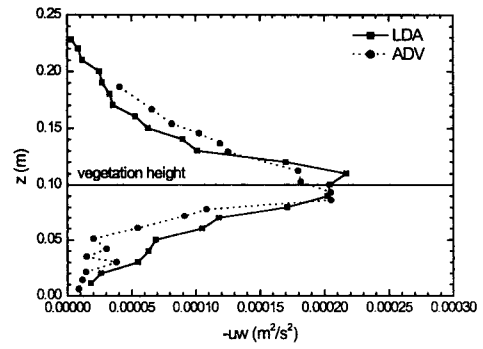


그림 3 레이놀즈 응력 분포

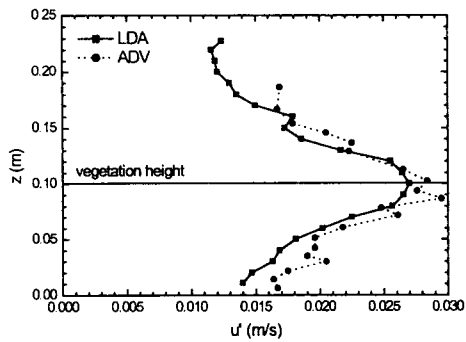


그림 4 흐름방향 난류강도

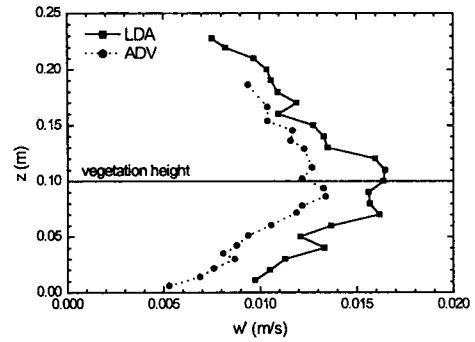


그림 5 수직방향 난류강도