

식생된 개수로 흐름의 난류 및 고유구조 Turbulence and Coherent Structures of Vegetated Open-Channel Flows

양원준¹⁾ · 최성욱²⁾

1. 서론

식생된 개수로 흐름의 부유사와 소류사의 퇴적, 연행, 그리고 이송은 식생에 의한 난류구조와 고유구조의 변화에 많은 영향을 받는다. 따라서 식생된 개수로 흐름에서 부유사의 거동을 이해하기 위해서는, 흐름의 난류구조 (turbulent structure)와 고유구조 (coherent structure)에 대한 이해가 필요하다. 고유구조란 바닥 부근에서 발생한 흐름이 상승과 하강을 주기적으로 반복하는 현상으로써, 이러한 고유구조의 주기성은 하상 토립자 연행의 수리학적 조건, 흐름 내 부유사의 농도 분포, 그리고 하상의 사구 형성과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다.

식생된 개수로 흐름의 난류특성을 규명하기 위한 연구는 발달된 실험장비와 컴퓨터의 도움에 힘입어 비교적 활발하게 진행되고 있다. Dunn (1996)은 음파 도플러 유속계 (ADV: Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용하여 휘어지지 않고 끝은 실린더를 식생으로 사용하여 난류구조의 변화에 대해 연구하였으며, 이를 이용하여 식생의 항력계수를 제시하였다. 실험결과 식생의 항력계수는 깊이에 따라 변하며, 식생높이의 1/3지점에서 최대값을 이루는 것을 확인하였다. Ikeda와 Kanazawa (1996)는 레이저 도플러 유속계 (LDA: Laser Doppler Anemometer)와 입자 영상 유속계 (PIV: Particle Image Velocimeter)를 이용하여 유연한 식생을 갖는 개수로 흐름의 난류구조와 식생높이 위의 구간에서 발생하는 와류 (vortex)에 대해 연구하였다. 레이놀즈 응력과 난류강도는 식생높이 부근에서 최대값을 가지는 것을 확인하였으며, 식생높이 이상에서는 분출현상에 의한 순간 레이놀즈 응력이 시간 평균된 레이놀즈 응력의 대부분을 구성하며, 식생높이 아래에서는 쓸기현상에 의한 순간레이놀즈 응력의 기여율 (contribution rate)이 다른 현상에 비하여 높은 것을 확인하였다. Nepf와 Vivoni (2000)는 ADV와 LDA를 이용하여 침수식생 및 정수식생일 경우 개수로 흐름의 난류구조에 대해 연구하였으며, 레이놀즈 응력의 분포형으로부터 침투수심 (penetration depth)을 정의하였다. 또한 Nepf와 Vivoni는 수리 실험을 통하여 일정 비율 (식생높이/수심) 이상에서는 식생높이 부근에 형성된 전단층 (shear layer)이, 일정 비율 이하에서는 압력 경사에 의한 전단응력이 난류에너지를 생성시키는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 식생이 하천흐름에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수리실험을 실시하였다. 실험 결과를 이용하여 평균유속, 레이놀즈 응력과 같은 난류구조에 대해 살펴보았으며, uw 사분면 기법을 이용하여 고유구조에 대해 연구하였다.

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

2) 연세대학교 사회환경시스템 공학부 부교수 (e-mail: schoi@yonsei.ac.kr)

2. 개수로 실험장치 및 실험 조건

본 실험은 연세대학교 수공학연구실이 보유하고 있는 가변 경사식 개수로 실험장치를 이용하였다. 개수로 실험장치의 재원은 폭 0.9 m, 높이 0.6 m, 그리고 길이 12 m이고, 바닥 경사는 0.0016으로 설정하였다. 모형 식생은 웨어에서 하류방향으로 4.5 m 지점부터 9.5 m 지점까지 총 5 m의 구간에 식재하였다. 길이 150 mm, 직경 5 mm의 플라스틱 실린더를 이용하여 식생을 구현하였으며, 1 m² 당 100 株의 모형 식생을 식재하였다 (식생밀도 = 0.5 m⁻¹). 본 실험에서 단위폭당 유량 (q)과 식생구간의 수심 (H_w)은 각각 0.06 m²/sec와 0.3 m로 설정하였으며, 실험조건은 표 1과 같다.

본 연구에서는 3차원 ADV를 이용하여 x , y , z 방향의 평균유속 (U , V , W)과 변동속도 (u , v , w)를 측정하였다. ADV의 측정부피 (sampling volume)는 0.25 cm³이내이고 유속의 허용오차는 0.1 mm/sec이며, 신호를 25 Hz로 측정할 때 무작위성 잡음 (random noise)은 1 % 정도로 알려져 있다. 식생구간 내의 흐름 양상은 비균일 (inhomogeneous)하므로 수평방향에 대하여 여러 점을 측정하여 앙상블평균 (ensemble average)을 취함으로써 x 와 y 방향에 대하여 균일한 난류량을 획득하였다. 본 연구에서는 기존 연구결과를 바탕으로 수평면에 대해 5개 지점을 선정하여 유속을 측정하였으며 모든 계산결과는 앙상블평균을 취하여 분석하였다.

3. 평균흐름 구조

3.1 평균유속

그림 1은 바닥으로부터 거리에 따른 평균유속의 변화를 도시한 것이다. 그림에서 h 는 식생높이, H_w 는 수면의 높이이다. 식생높이보다 높은 구간에서는 일반적인 개수로의 유속분포와 유사한 대수분포의 형태를 보이는 것으로 판단된다. 그러나 식생높이 부근에서 속도경사가 커지며, 식생높이보다 낮은 구간에서는 식생이 존재하지 않는 개수로 흐름의 유속분포와 전혀 다른 양상을 나타내고 있다. 식생높이 부근에서 속도경사가 커지는 것은 식생의 영향으로 인하여 마찰속도가 증가하며 마찰속도에 비례하여 속도경사 역시 증가하기 때문으로 판단된다 (강형식과 최성욱, 2000). 대수분포의 형태를 나타내는 구간의 유속분포는 다음의 식과 같은 대수법칙으로 표현할 수 있다.

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z - d_0}{z_0} \right) \quad (1)$$

여기서 κ 는 von Karman상수 (= 0.4), d_0 는 zero-plane displacement, u_* 는 전단속도, z_0 는 하상의 조도를 나타내는 계수이다. 식 (1)에서 결정하여야 할 매개변수는 d_0 , u_* , z_0 이다. Zero-plane displacement는 조도요소를 가지는 거친하상을 매끈한 하상으로 만들 경우 가상적으로 정해지는 평균 높이로서 본 연구에서는 10.9 cm로 산정되었다 (Jackson, 1981).

식 (1)은 $z = d_0$ 를 바닥 경계로 하여 d_0 이상의 구간에 대하여 적용 가능하며, 이 경우 흐름의 유효수심은 $H_w - d_0$ 가 된다. 하상의 조도를 나타내는 계수 z_0 는 식 (1)에 의하여 계산되어지는 유속분포와 측정된 유속분포를 비교하여 결정한다. 본 연구에서는 $z_0 = 0.01$ cm로 산정되었다.

3.2 레이놀즈 응력

그림 2는 레이놀즈 응력의 z 방향 변화를 도시한 것이다. 바닥으로부터의 거리 (z)는 식생높이 (h)로 무차원화시켰다. 레이놀즈 응력은 식생높이 부근에서 최대값을 형성하며 수면과 바닥, 양방향으로 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 식생높이 부근에서 발생하는 항력의 불연속에 의하여 강한 전단층이 형성되기 때문이다 (Nepf와 Vivoni, 2000). 그리고 Nepf와 Vivoni는

식생구간 내부에서 레이놀즈 응력이 최대값의 10 %에 해당하는 지점을 침투수심 (h_p)으로 정의하였다. 본 실험에서 레이놀즈 응력의 최대값은 약 $6.5 \text{ cm}^2/\text{sec}^2$ 이며 $z = 3 \text{ cm}$ 에서 최대값의 10 %인 $0.65 \text{ cm}^2/\text{sec}^2$ 으로 나타났으며 침투수심 h_p 는 $0.2h$ 정도로 산정되었다. 또한 전단속도는 zero-plane displacement 지점에서의 레이놀즈 응력을 이용하여 $2.55 \text{ cm}/\text{sec}$ 으로 산정되었다. 침투수심 위 ($z > h_p$)와 아래 ($z < h_p$) 구간을 각각 연직방향 교환영역 (vertical exchange zone)과 종방향 교환영역 (longitudinal exchange zone)으로 구분하였다. 종방향 교환 영역은 레이놀즈 응력이 거의 0에 가까운 값을 나타내는 구간으로서 난류에 의한 운동량의 전달을 무시할 수 있다. 이 구간에서 흐름은 정수식생일 경우와 비슷한 특성을 나타낸다. 연직방향 교환영역은 연직방향으로의 난류 교환이 운동량의 전달에 미치는 영향이 현저한 구간이다.

4. 식생된 개수로 흐름의 고유구조

uw 사분면 기법 (Lu와 Willmarth, 1973)은 주흐름 방향 (x)과 연직 방향 (z)의 변동속도인 u 와 w 를 이용하여 bursting 현상을 검출하며, bursting 현상이 레이놀즈 응력에 미치는 영향과 bursting 현상의 주기 등을 파악할 수 있다. 최성욱과 박문형 (2001)은 콘크리트 블록이 포설된 개수로 흐름에 uw 사분면 기법을 적용하여 순간 레이놀즈 응력 (instantaneous Reynolds stress)의 조건부 확률과 bursting 현상의 주기에 대하여 연구한 바 있다. 그림 3에 제시된 바와 같이 순간 레이놀즈 응력은 u 와 w 의 부호에 따라 외향상호작용 (outward interaction), 분출현상 (ejection), 내향상호작용 (inward interaction), 그리고 쓸기현상 (sweep)의 4개영역으로 구분된다. 그림에서 사선으로 표시된 영역은 임계값 H (hole size: threshold level)에 의해 결정되는 배제구간으로서 다음과 같이 시간 평균된 레이놀즈 응력에 대한 임의 크기의 무차원 레이놀즈 응력이다.

$$H = |\psi| = \left| \frac{uw}{\overline{uw}} \right| \quad (2)$$

여기서 \overline{uw} 는 시간 평균된 레이놀즈 응력이다. 식 (2)는 uw 사분면 기법에서 bursting 현상의 검출기준으로 사용되며, 각 사분면에서 무차원화된 순간 레이놀즈 응력의 절대값이 식 (2)에 의하여 결정된 H 보다 작은 경우에는 앞에서 언급한 4개영역에서 제외된다. 각 영역에 포함되는 순간 레이놀즈 응력 (uw)이 시간 평균된 레이놀즈 응력 (\overline{uw})에 미치는 영향인 기여율 (contribution rate) RS_i 는 다음 식으로부터 계산한다.

$$RS_i = \int_{-\infty}^{-H} \psi p_i(\psi) d\psi \quad i=1, 3 \quad (3)$$

$$RS_i = \int_H^{\infty} \psi p_i(\psi) d\psi \quad i=2, 4 \quad (4)$$

여기서 i 는 각 사분면, $p_i(\psi)$ 는 i 사분면에 위치할 조건부 확률이다. 그림 4는 무차원 수심이 각각 0.5, 1.033, 1.5인 지점에서 배제구간의 임계값 H 에 따른 각 사분면에서의 조건부 확률을 도시한 그림이다. 모든 임계값 H 에 대해 2와 4 사분면 (분출과 쓸기 현상)에 해당되는 조건부 확률이 1과 3 사분면에 해당하는 상호작용보다 현저하게 크게 나타나며 배제구간의 임계값 H 가 10을 초과할 경우 상호작용이 나타나지 않는 것을 확인하였다. 그리고 각 지점에서의 조건부 확률은, 상호작용들이 전 수심에 걸쳐서 일정하게 나타나지 않는 것을 보여준다. 식생높이보다 높은 구간에서는 분출현상이 쓸기현상에 비해 높은 빈도로 나타나며, 식생높이 근처에서는 두 현상이 동일한 빈도를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 그러나 식생높이보다 낮은 구간에서는 식생높이보다 높은 구간과는 달리 쓸기현상이 지배적으로 나타남을 확인하였다.

그림 5는 식생높이보다 높은 구간, 낮은 구간, 그리고 식생높이 부근에서의 H 의 변화에

따른 순간 레이놀즈 응력의 평균 레이놀즈 응력에 대한 기여율 변화를 도식한 것이다. 그림 4와 유사하게 식생높이 이상에서는 분출현상이, 식생높이 아래에서는 쓸기현상에 의한 레이놀즈응력이 지배적임을 확인할 수 있다. 이것은 Lopez와 Garcia (1997)가 조약돌 하상을 갖는 개수로 흐름을 uw 사분면 기법을 이용한 기여율 분석 결과, 분출현상과 쓸기현상이 각각 조약돌 평균입경의 위와 아래에서 지배적으로 발생하는 것과 매우 유사한 것이다. Raupach와 Thom (1981)은 조도저층 바로 위에 매끈한 바다의 관성아 영역과 동일한 특성을 가지는 완충층 (buffer layer)이 존재하는 것을 밝힌바 있다. 완충층 이후 구간에서는 분출현상이 크게 나타나며, 완충층 아래 구간에서는 쓸기현상이 크게 나타난다. 앞에서 언급한 기존의 연구결과를 바탕으로 식생높이와 zero-plane displacement 근처에서 완충층과 유사한 천이구간이 발생하는 것으로 보이며 zero-plane displacement를 전단속도 및 기타 난류량의 기준점으로 선정한 것이 적절하다고 판단된다.

개수로 흐름 내부에 식생이 위치할 경우 수심에 따른 부유사량의 분포에 변화가 생긴다. 강형식과 최성욱 (2000)은 수치모의를 통해 식생된 개수로 흐름의 부유사량 분포는 일반 개수로에 비해 균일해지는 것을 확인하였다. 이것은 본 실험결과와 일치하는 것으로서 식생높이 위에서는 분출현상이 강하게 나타나기 때문에 식생이 없는 경우에 비하여 더욱 많은 양의 토사를 부유상태로 유지할 수 있으며, 식생높이 아래에서의 강한 쓸기현상은 식생에 의해 퇴적된 토립자를 다시 부상시키기 때문에 전 수심에 걸친 부유사 농도분포가 균일해지는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 식생된 개수로 흐름의 고유구조를 규명하기 위하여 수리모형 실험을 실시하였다. 플라스틱 실린더를 이용하여 식생된 개수로 흐름을 구현하였으며, 유입부의 영향이 없고 흐름이 잘 발달된 지점에서 ADV를 사용하여 유속을 측정하였다. 바닥으로부터 거리에 따른 평균 유속과 레이놀즈 응력에 대해 살펴보았다. 유속분포의 경우, 식생높이 위에서는 일반적인 개수로 흐름과 유사한 대수법칙을 따르며, 식생높이 아래에서는 유속의 감소가 현저하게 발생하였다. 레이놀즈 응력은 식생높이 부근에서 최대값을 가지는 것으로 나타났다. 식생에 의한 고유구조의 변화는 유속의 변동성분을 uw 사분면 기법을 이용하여 분석하였다. 식생높이보다 높은 구간에서는 분출현상이 지배적으로 나타났으며, 식생높이보다 낮은 구간에서는 쓸기현상이 지배적으로 나타났다. 그리고 식생높이 근처에서는 분출현상과 쓸기현상이 비슷하게 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 고유구조의 변화는 부유사 농도분포를 전 수심에 걸쳐 균일하게 만드는 것으로 판단되며, 이것은 기존의 수치모의 결과와 일치한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 “2000년 산·학·연 공동연구 개발사업-자연식생을 이용한 하천 및 하수정화기술 실용화” 지원에 의해 수행되었으며, 지원에 감사드립니다 (과제번호: 22-02)

참고문헌

- 강형식, 최성욱 (2000). “식생된 개수로에서 난류 구조와 부유사 이동 현상의 수치해석.” 수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 33(5), 581-592.
- 최성욱, 박문형 (2001). “균일 조고 개수로 흐름의 고유구조.” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 21(4-B), 347-357.
- Dunn, C.J. (1996). *Experimental determination of drag coefficients in open channel with simulated vegetation*, M.S. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.
- Ikeda, S. and Kanazawa, M. (1996). “Three dimensional organized vortices above flexible water

- plants." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 122(11), 634-640.
- Jackson, P.S. (1981). "On the displacement height in the logarithmic velocity profile." *Journal of Fluid Mechanics*, 111, 15-25.
- Lopez, F. and Garcia, M. (1997). *Open-channel flow through simulated vegetation: Turbulence modeling and sediment transport*. Wetlands Res. Program Tech. Rep. WRP-CP-10, Waterw. Exp. Stn., Vicksburg.
- Lu, S.S. and Willmarth, W.W. (1973). "Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer." *Journal of Fluid Mechanics*, 60, 481-511.
- 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.
- Raupach, M.R. and Thom A.S. (1981). "Turbulence in and above plant canopies." *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 13, 97-129.

표 1 실험 조건

q (m ² /sec)	H (m)	U_m (m/sec)	Re	Fr	S_0
0.06	0.3	0.20	60000	0.14	0.0016

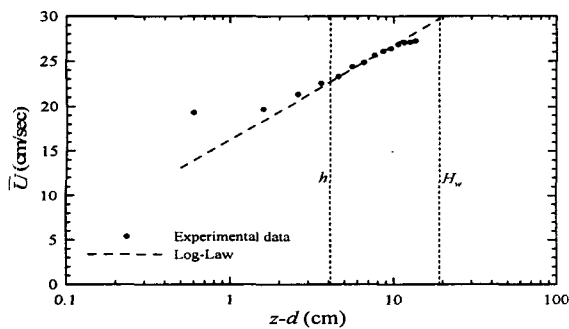


그림 1 평균유속 분포와 대수법칙

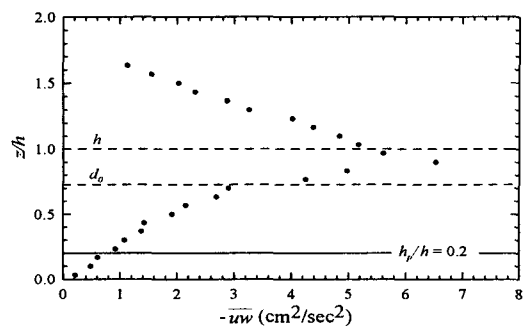


그림 2 레이놀즈 응력 분포

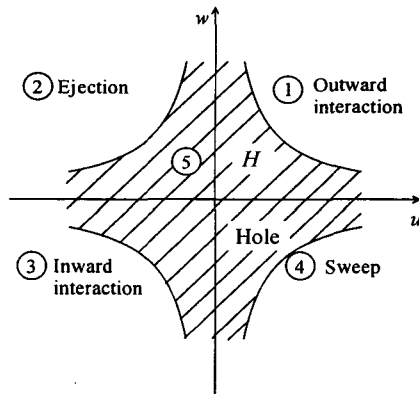


그림 3 Bursting 현상의 분류

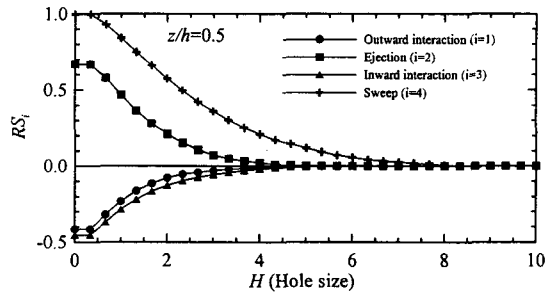
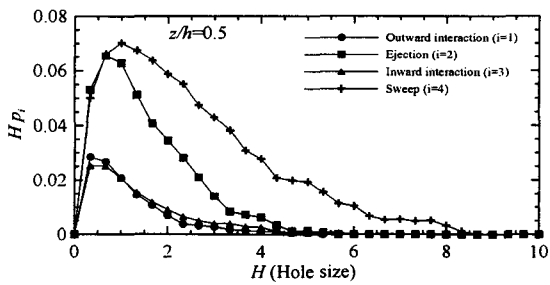
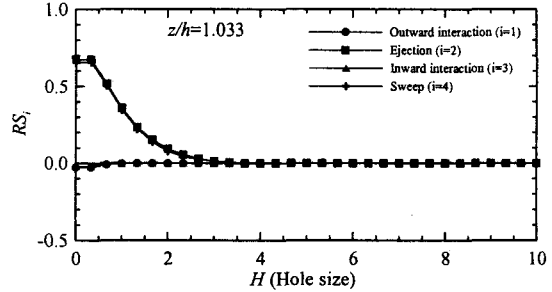
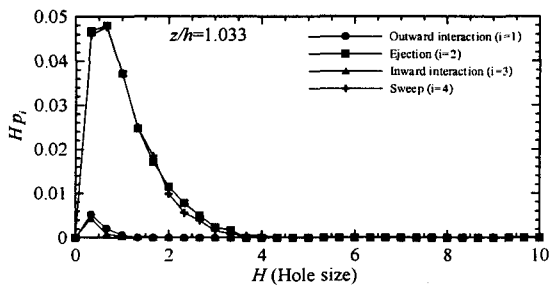
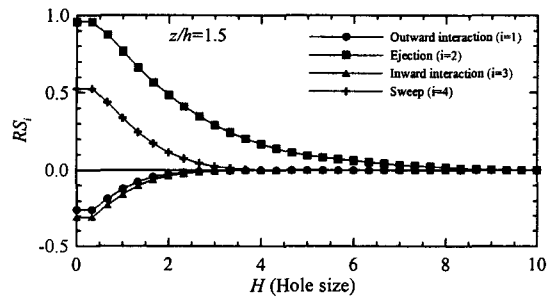
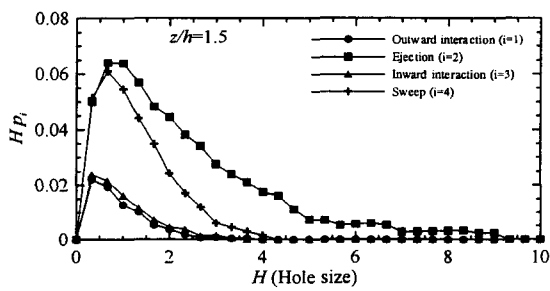


그림 4 바닥으로부터의 거리와 배제조건에 따른 조건부 확률분포

그림 5 바닥으로부터의 거리와 배제조건에 따른 평균 레이놀즈 응력에의 기여율