

# 침수식생 개수로 흐름의 고유구조

## Coherent Structure of Open-channel Flows with Submerged Vegetation

양원준\*, 최성욱\*\*

Wonjun Yang, Soun-Uk Choi

### 요 지

자연 저항체인 식생은 유체역학적으로 하천의 평균흐름과 난류량을 변화시키며, 이와 관련하여 유사, 영양 물질, 용존 산소, 그리고 서식 동물 등에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 과거에는 식생된 수로의 흐름을 식생에 의해 항력이 증가된 경계층 흐름으로 단순하게 보아 왔으나, 근래의 실험유체역학적 연구는 식생된 하천 흐름에 대한 미시적인 구조를 규명하였다. 본 연구는 식생수로에서 평균흐름 및 난류량에 관한 수리특성을 분석하고자 하며, 부유사의 퇴적, 유입, 이송 등의 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 고유구조를 파악하였다.

식생된 개수로 흐름의 일반적인 평균흐름 및 난류구조는 기존의 연구결과와 동일하였으며, 본 연구에서 중점을 둔 고유구조의 경우, 식생높이를 기준으로 하여 상·하부의 흐름특성이 서로 상이한 것을 확인하였다. 식생높이 상부에서는 유속이 수면방향을 향하는 분출현상이 지배적으로 나타났으며, 식생높이 하부에서는 이와는 반대로 유속의 변동성분이 하상으로 향하는 쓸기현상이 지배적으로 나타났다. 이는 개수로에 식생이 존재할 경우 부유사의 농도분포가 수심에 따라 일정해지는 것에 대한 물리적인 근거로 파악된다.

**핵심용어:** 식생된 개수로흐름, 난류구조, 고유구조, 쓸기현상, 분출현상

### 1. 서론

하천에 존재하는 자연 저항체인 식생은 유체역학적으로 하천의 평균흐름과 난류량을 변화시키며, 이와 관련하여 유사, 영양 물질, 용존 산소, 그리고 서식 동물 등에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Guo 등, 1989). 과거에는 식생된 수로의 흐름을 식생에 의해 항력이 증가된 경계층 흐름으로 단순하게 보아 왔으나, 근래의 실험유체역학적 연구는 식생된 하천 흐름에 대한 미시적인 구조를 규명하였으며 (Nepf와 Vivoni, 2000; 최성욱 등, 2003), 식생이 하천 및 생물 다양성 증대 등의 생태학적 순기능을 가지고 있음을 확인하였다 (Kadlec, 1995).

식생수로의 평균흐름은 다음 그림 1에 도시된 것과 같이 식생의 높이와 수심에 따라 표면저항 흐름 (unconfined terrestrial canopy flow), 침수식생 흐름 (submerged canopy flow), 그리고 정수식생 흐름 (emergent canopy flow)과 같이 3가지 형태로 구분되며, Carollo 등 (2002)에 의하면 침수식생 흐름이 가장 일반적인 식생된 개수로 흐름의 형태인 것으로 알려져 있다. 그러나 침수식생 조건에서 개수로의 평균흐름 및 난류량은 식생의 수심비에 큰 영향을 받으며, 식생 높이 부근에서 형성되는 강한 전단층 (shear layer), 식생에 의한 3차원 효과 등 흐름양상이 매우 복잡하다. 이와 같이 식생된 개수로 흐름은 기존에 많은 연구가 수행된 일반 개수로 흐름과는 전혀 다른 특징을 가지고 있으며, 이는 평균유속 분포, 난류구조, 고유구조 등 모든 면에서 일반 개수로 흐름과는 다른 새로운 산정기법이 필요함을 의미한다.

본 연구는 침수식생 개수로 흐름의 유속을 레이저 도플러 유속계를 이용하여 측정하는 실험연

\* 정희원 · 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정 · e-mail: pulip@yonsei.ac.kr

\*\* 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

구이다. 유속 측정결과를 이용하여 식생수로에서 평균흐름 및 난류량에 관한 수리특성을 분석하고자 하며, 부유사의 퇴적, 유입, 이송 등의 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 고유구조를 파악하고자 한다.

## 2. 수리실험장치 및 유속측정장치

본 연구에서 사용한 개수로의 제원은 폭 0.45 m, 높이 0.50 m, 그리고 길이 8.0 m로, 유성 페인트로 마감하였으며, 하상 및 측벽에 매끈한 조건을 부여하기 위해 #2,000의 고운 사포로 마무리 하였다. 그림 2는 제작된 실험 수로의 실제 모습을 나타낸 것으로서, 정상류 상태를 보일 것으로 판단되는 상류단으로부터 6.5 m ~ 7.5 m 떨어진 지점에 3개의 관측창을 설치하였다. 관측창의 재질은 두께가 3 mm인 일반 투명유리를 사용하였다. 유속측정장치로는 레이저 도플러 유속계 (LDA)를 이용하였다. 식생구간 내의 흐름 양상은 비균일 (inhomogeneous)하므로 수평방향에 대하여 여러 점을 측정하여 앙상블평균 (ensemble average)을 취함으로써 x와 y방향에 대하여 균일한 난류량을 획득할 수 있다. 본 연구에서는 수평면에 대하여 5개 지점을 선정하여 난류량을 측정하였으며 모든 계산결과는 앙상블평균을 취하여 분석하였다. 실험에 사용한 흐름조건은 표 1과 같다.

## 3. 수리실험 결과

그림 2는 바닥으로부터의 거리에 따른 평균유속의 변화를 도시한 것이다. 그림에서  $z$ 는 식생높이 ( $h$ )로 무차원화하였다. 식생높이보다 높은 구간에서는 일반적인 개수로의 유속분포와 유사한 대수분포의 형태를 보이고 있다. 그러나 식생높이 부근에서 속도경사가 커지며, 식생높이보다 낮은 구간에서는 식생이 존재하지 않는 개수로 흐름의 유속분포와 전혀 다른 양상을 나타내고 있다. 식생높이 부근에서는 식생의 영향으로 인하여 마찰속도가 증가하며 마찰속도에 비례하는 속도경사 역시 증가한다. 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  $\kappa$ 는 von Karman상수 (=0.4),  $d_0$ 는 기준면 변위 (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. 기준면 변위는 운동량 흡수 (absorption)되는 지점으로서 다음 식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$d_0 = \frac{\int_0^h \frac{d \overline{uw}}{dz} z dz}{\int_0^h \frac{d \overline{uw}}{dz} dz} \quad (2)$$

본 실험에서 식 (2)를 이용하여 계산한 기준면 변위는 7.5 cm이다. 식 (1)은  $z = d_0$ 를 바닥 경계로 하여  $d_0$  이상의 구간에 대하여 적용 가능하다. 이 경우 흐름의 유효수심은  $H - d_0$ 가 되며, 바닥 경계에서의 전단속도는 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$u_* = [gS_0(H - d_0)]^{1/2} \quad (3)$$

본 연구에서 식 (3)을 이용하여 산정한 전단속도는 5.46 cm/sec이다. 하상의 조도를 나타내는 계수

$z_0$ 는 식 (15)에 의하여 계산되어지는 유속분포와 측정된 유속분포를 비교하여 결정한다. 본 연구에서는  $z_0 = 0.01$  cm로 산정되었다. 결정된 매개변수를 이용하여 대수법칙을 적용한 결과는 그림 3과 같다.

그림 4는 레이놀즈 응력의  $z$ 방향 변화를 도시한 것이다. 그림에서 식생높이 부근에서 레이놀즈 응력이 최대값을 형성하며 수면과 바다, 양방향으로 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 식생높이 부근에서 레이놀즈 응력의 최대값이 형성되는 이유는 식생높이 부근에서 발생하는 항력의 불연속에 의하여 강한 전단층 (shear layer)이 형성되기 때문이다 (Nepf와 Vivoni, 2000). Nepf와 Vivoni (2000)는 식생영역 내에서 레이놀즈 응력이 최대값의 10%에 해당하는 지점을 침투수심 ( $h_p$ )라고 정의하였으며, 침투수심 위 ( $z > h_p$ )와 아래 ( $z < h_p$ ) 구간을 각각 연직방향 교환 영역과 흐름방향 교환 영역으로 구분하였다. 흐름방향 교환 영역은 레이놀즈 응력이 거의 0에 가까운 값을 나타내는 구간으로서 난류에 의한 운동량의 전달을 무시할 수 있다. 이 구간에서의 흐름은 정수식생 조건에서의 흐름과 유사한 특징을 나타낸다. 연직방향 교환 영역은 연직방향의 난류 교환이 운동량의 전달에 미치는 영향이 현저한 구간이다. 본 실험에서 레이놀즈 응력의 최대값은 약  $6.5 \text{ cm}^2/\text{sec}^2$ 이며  $z = 3$  cm에서 최대값의 10 %인  $0.65 \text{ cm}^2/\text{sec}^2$ 으로 나타났으며 침투수심  $h_p$ 는  $0.2h$ 정도로 산정되었다. 그림 5와 그림 6은 흐름방향과 수직방향의 난류강도 ( $u'$ ,  $w'$ )을 도시한 것이다. 식생높이 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.

거친 하상을 갖는 개수로 흐름의 바닥 부근에서는 흐름의 분리 (separation)가 발생하며, 이렇게 분리된 흐름이 상승과 하강을 반복하는 것을 bursting 현상이라고 한다. 개수로 흐름의 고유구조 중에서 bursting 현상의 주기성은 하상 토립자 유입의 수리학적 조건, 흐름 내 부유사의 농도 분포, 그리고 하상의 사구 형성과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다 (Sechet와 Le Guennec, 2000). 본 연구에서 사용한  $uw$  사분면 기법은 주흐름 방향 ( $x$ )과 연직 방향 ( $z$ )의 진동속도인  $u$ 와  $w$ 를 이용하여 bursting 현상을 검출하며, bursting 현상이 레이놀즈응력에 미치는 영향과 bursting 현상의 주기 등을 파악할 수 있다. 순간 레이놀즈응력은  $u$ 와  $w$ 의 부호에 따라 외향상호작용 (outward interaction), 분출현상, 내향상호작용 (inward interaction), 그리고 쓸기현상의 4개 영역으로 구분할 수 있으며 다음 식과 같은 방법으로 순간 레이놀즈응력의 임계값  $H_t$  (hole size: threshold level)을 결정한다.

$$H_t = |\psi| = \left| \frac{uw}{uw} \right| \quad (4)$$

여기서  $\overline{uw}$ 는 시간평균된 레이놀즈응력이다. 식 (4)는  $uw$  사분면 기법에서 bursting 현상의 검출기준으로 사용되며, 각 사분면에서 무차원화된 순간 레이놀즈응력의 절대값  $H_t$  보다 작은 경우에는 4개의 영역 (외향상호작용, 분출, 내향상호작용, 그리고 쓸기)에서 제외된다. 앞에서 언급된 각 영역에 포함되는 순간 레이놀즈응력 ( $uw$ )이 시간평균 레이놀즈응력 ( $\overline{uw}$ )에 미치는 영향인 기여율 (contribution rate)  $RS_i$ 는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$RS_i = \int_{-\infty}^{-H_t} \psi p_i(\psi) d\psi \quad i = 1, 3 \quad (5)$$

$$RS_i = \int_{H_t}^{\infty} \psi p_i(\psi) d\psi \quad i = 2, 4 \quad (6)$$

여기서  $i$ 는 각 사분면을 나타내고,  $p_i(\psi)$ 는  $i$  사분면에 위치할 조건부 확률을 나타낸다. 그림 7은

무차원 수심이 각각 0.5, 1.033, 1.5인 지점에서의 배재구간의 임계값  $H_c$ 에 따른 각 사분면에서의 조건부 확률을 도시한 그림이다. 모든 영역에서 2와 4 사분면의 분출과 쓸기 현상의 경우 조건부 확률이 1과 3 사분면에 해당하는 상호작용보다 현저하게 크게 나타나고 있으며, 배재구간의 임계값이 10을 초과할 경우 상호작용이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 그림을 살펴보면 각 지점에서의 상호작용이 전 수심에 걸쳐 일정하게 나타나지 않는 것을 보여주고 있다. 식생높이보다 높은 구간에서는 분출현상이 쓸기현상에 비해 높은 빈도로 나타나고 있으며, 식생높이 근처에서는 두 현상이 동일한 빈도를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 식생높이보다 낮은 구간에서는 분출보다 쓸기현상이 지배적으로 나타나고 있음을 알 수 있다. Lopez와 Garcia (2001)이 조약돌 하상의 개수로에서 uw 사분면 기법을 이용한 기여율 분석 결과를 통하여 분출현상과 쓸기현상이 각각 조약돌 평균입경의 위와 아래에서 지배적으로 발생하는 것을 확인하였다. Raupach와 Thom (1981)는 조도 저층 바로 위 매끈한 바닥의 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. 즉 식생높이와 변위된 기준면 근처에서 완충층이 발생하는 것으로 판단되며 앞에서 언급한바와 같이 기준면 변위를 통해 얻은 새로운 기준면을 전단속도 및 기타 난류량의 기준면으로 보는 것이 타당한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구의 목적은 침수식생 개수로 흐름의 유속을 레이저 도플러 유속계를 이용하여 측정하는 실험연구이다. 침수식생 개수로 흐름의 유속 측정에 관한 문헌 조사를 통하여 식생된 개수로 흐름의 일반적인 흐름 특성을 파악하였으며, 기존 관련 연구의 경향 및 성과를 파악하였다. 전술한 바와 같이 침수식생 개수로 흐름의 평균흐름 및 난류구조 그리고 고유구조를 파악하기 위한 수리실험을 수행하였다. 나무 막대를 이용하여 침수식생 개수로 흐름을 구현하였으며, 유입부의 영향이 없고 흐름이 잘 발달된 지점에서 연세대학교 수공학 연구실이 보유하고 있는 2차원 LDA를 이용하여 침수식생 개수로 흐름의 유속을 측정하였다. 측정자료를 이용하여 바닥으로부터의 거리에 따른 평균유속과 레이놀즈 응력, 난류강도, 와점성계수, 그리고 난류운동에너지 등의 난류량 변화를 관찰하였으며, 쓸기현상과 분출현상으로 대변되는 고유구조의 변화를 파악하였다.

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 개수로 흐름의 고유구조를 파악하기 위해 uw 사분면 기법을 사용하였다. 분석결과 식생높이를 기준으로 하여 상·하부의 흐름특성이 서로 상이한 것을 확인하였다. 식생높이 상부에서는 유속이 수면방향을 향하는 분출현상이 지배적으로 나타났으며, 식생높이 하부에서는 이와는 반대로 유속의 변동성분이 하상으로 향하는 쓸기현상이 지배적으로 나타났다. 이는 개수로에 식생이 존재할 경우 부유사의 농도분포가 수심에 따라 일정해지는 것에 대한 물리적인 근거로 파악된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심 기술연구개발사업 (03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

#### 참고문헌

- 최성욱, 양원준, 박문형 (2003). “수심의 영향을 받는 침수 식생 개수로 흐름의 난류구조 및 고유구조.” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 23(3B), 165-174.
- Carollo, F.G., Ferro, V., and Termini, D. (2002). "Flow velocity measurements in vegetated

channel." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 128(7), 664-673.

Guo, W., Shaw, R.H., and Pawu, K.T. (1989). "Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy." Boundary-Layer Meteorology, 47, 349-377.

Kadlec, R. (1995). "Overview: Surface flow constructed wetlands." Water Science Technology, 32, 1-12.

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.

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." Ann. Rev. Fluid Mech., 13, 97-129.

Sechet, P. and Le Guennec, B. (1981). "Bursting phenomenon and incipient motion of solid particles in bed-load transport." Journal of Hydraulic Research, IAHR, 37(5), 683-696.

<표 1.> 수리실험 조건

Bed Condition	$q$ (m <sup>2</sup> /sec)	$U_m$ (m/s)	$h$ (m)	$Re$ (-)	$Fr$ (-)	$S$ (-)
vegetated	0.00375	0.25	0.15	37,500	0.21	0.0016

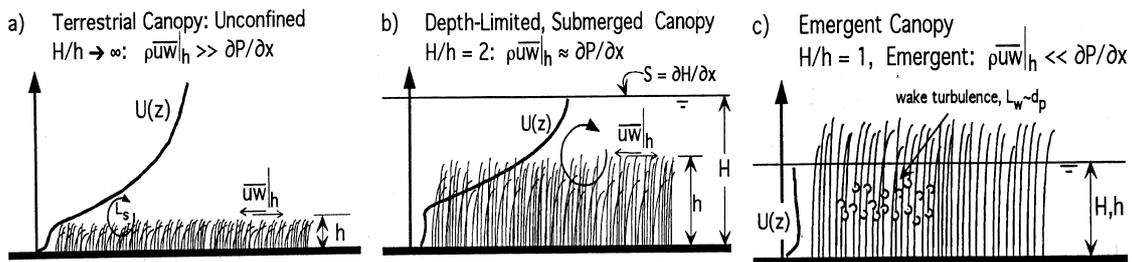


그림 1. 식생된 개수로 흐름의 수심비에 따른 수리학적 특성 변화 (Nepf와 Vivoni, 2000)

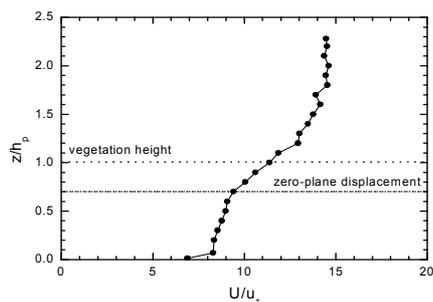


그림 2. 평균유속 분포

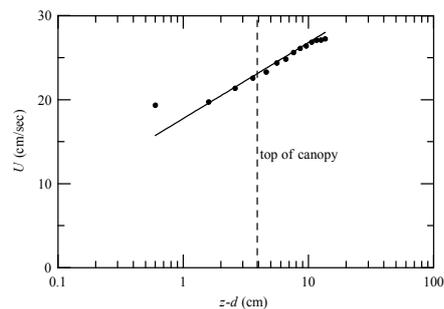


그림 3. 평균유속과 대수법칙

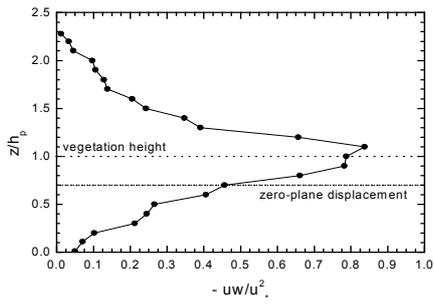


그림 4. 레이놀즈 응력 분포

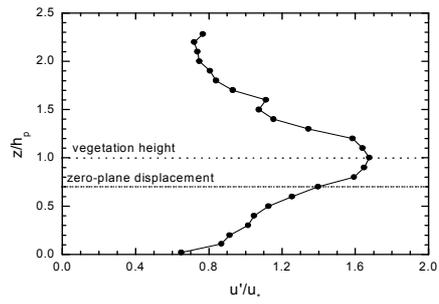


그림 5. 흐름방향 난류강도

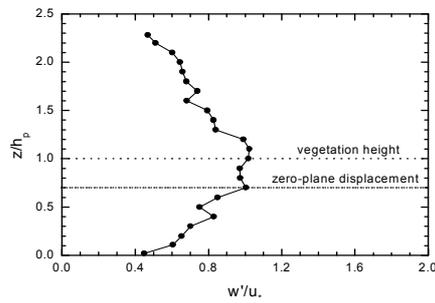


그림 6. 수직방향 난류강도

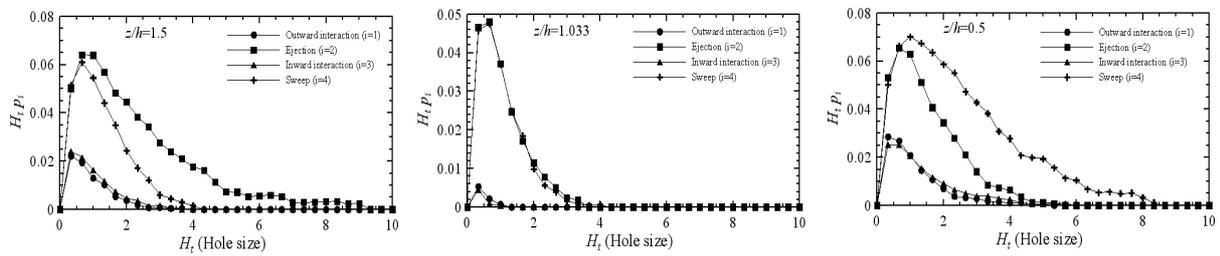


그림 7. 바닥으로부터의 거리별 임계값에 따른 각 사분면에서의 조건부 확률