

# 정수식생 개수로 흐름에서 횡방향 와점성 계수

## Lateral Eddy Viscosity for Open-Channel Flows through Emergent Vegetation

이진휘\*, 최성욱\*\*  
Jinhwi Lee, Sung-Uk Choi

### 요 지

본 연구는 하천에서 식생에 의한 흐름구조 변화가 오염물질 이동에 미치는 영향을 알아보기 위해 흐름방향 확산계수를 산정하였다. 정수식생 조건에서 횡방향 수심적분된 와점성계수는 비식생 조건에서의 와점성계수와 다르게 적용되어야 하며 이를 위해 유량 횡분배법을 Jordanova and James (2003) 실험에 적용하였다. 제시된 실험조건을 잘 재현하는 와점성계수의 값을 역산하였으며, 이에 관한 산술평균 값을 향후 수리모형의 적용을 위해 정수식생 조건에서의 무차원 와점성계수로 제안하였다. 결정된 무차원 와점성계수를 이용하여 부분식생 개수로 흐름에서 흐름방향 확산계수를 산정하여 오염물질의 이동에 대한 특성을 분석하였다.

**핵심용어:** 식생, 유사이동, 무차원 와점성계수, 흐름방향 확산계수, 횡방향 유량분배법, 난류 점성

### 1. 서 론

하도 혹은 하안 식생은 유동에 저항을 제공하여 유수를 가속시키지 않고 수위를 상승시키며, 반대로 유동은 이들이 자라고 생태계를 유지하도록 환경생태유량을 제공한다. 식생은 하도내 토사가 퇴적되도록 유도하며, 토사의 퇴적과 침식은 식생의 생장과 소멸에 직접 관여되기도 한다. 또한, 하도는 식생의 서식공간을 제공하고 식생은 유사이동을 통하여 하도형태의 변화에 영향을 준다. 이와 같이 하천의 구성 인자간 상호관계에서 토사의 퇴적 및 침식에 영향을 미치는 수리학적 인자는 와확산계수 혹은 와점성계수이다 (난류 Prandtl/Schmidt 수를 1로 보면 와확산 계수를 와점성계수로 볼 수 있다).

Fischer et al. (1979)에 의하면 일반적인 개수로 흐름에서 무차원 와점성계수  $\epsilon/(u_*^2 H)$ 는 종방향, 횡방향, 그리고 연직방향으로 각각 0.15, 0.15, 0.067이다 (여기서  $u_*$  = 전단속도,  $H$  = 수심). 수심방향의 무차원 와점성계수의 값은 타원형의 와점성계수의 분포를 가정하여 적분한 값과 동일하다. 한편, Darby and Thorne (1996)은 유량 횡분배법을 영국의 여러 하천에 적용하여 횡방향 무차원 와점성계수가 약 0.16임을 보였다. 본 연구는 정수식생 조건의 개수로 흐름에서 횡방향 수심적분된 와점성계수에 관한 연구이다.

식생 흐름에서 확산계수는 난류에 의한 확산과 식생줄기에 의한 기계적인 확산으로 구분된다.

\* 연세대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정 · E-mail : [guyjinh@yonsei.ac.kr](mailto:guyjinh@yonsei.ac.kr)

\*\* 정회원 · 연세대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 · E-mail : [schoi@yonsei.ac.kr](mailto:schoi@yonsei.ac.kr)

정수식생 조건에서 난류에 의한 확산은 크게 억제될 것으로 보인다. 정수식생 조건에서 횡방향 와점성계수를 구하기 위해 유량 횡분배법을 Jordanova and James (2003) 실험에 적용하였다. 제시된 실험조건을 잘 재현하는 와점성계수의 값을 역산하였으며, 이에 관한 산술평균 값을 향후 수리모형의 적용을 위해 정수식생 조건에서의 무차원 와점성계수로 제안하였다.

## 2. 지배방정식

### 2.1 유량 횡분배모형

본 연구에서 Wark et al. (1990)과 Knight and Shiono (1990)이 제시한 유량 횡분배모형 (lateral distribution method)을 사용하여 개수로 횡단면에 대한 수심적분된 유속을 얻었으며 이는 다음 식 (1)을 통해 구할 수 있다.

$$gh = \frac{\rho g n^2}{h^{1/3}} B_y u^2 + F_v - \rho h \frac{\partial}{\partial y} \varepsilon_y \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

여기서,  $x$ 와  $y$ 는 각각 종방향과 횡방향을 의미하며,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $h$ 는 수심,  $S_x$ 는 종방향 하상경사,  $B_y$ 는 기하학적 인자 ( $= 1 + S_x^2 + S_y^2$ , 여기서  $S_y$ 는 횡방향 하상경사),  $n$ 은 조도계수,  $\varepsilon_y$ 는 수심적분된 횡방향 와점성 계수이다. 횡방향 와점성 혹은 난류 확산 계수는 식 (2)와 같다.

$$\varepsilon_y = \chi_y U_* h \quad (2)$$

여기서  $\chi_y$ 는 무차원 횡방향 와점성 계수,  $U_*$ 는 전단속도이다. 식 (1)의  $F_v$ 는 식생항력으로 식 (3)과 같이 주어진다.

$$F_v = \frac{\rho}{2} C_d a h_p u^2 \quad (3)$$

여기서  $C_d$ 는 식생의 항력계수로서 식생줄기 뿐만 아니라 잎의 영향까지도 포함되며,  $a$ 는 식생밀도,  $h_p$ 는 식생높이를 의미한다. 식 (1)은 수심적분된 횡방향 유속을 구하는 식으로 이차류에 의한 영향은 고려되지 않았다.

### 2.2 횡방향 와점성 계수

일반적으로 사행의 영향이 없는 직선 수로에서 횡방향 와점성 계수는 폭-수심 비, 횡방향 경사 (혹은 횡방향 전단력 변화), 그리고 하상의 불규칙성이다 (Holley, 1996). 직사각형 수로에서 실험 결과는 횡방향 무차원 점성계수가 0.1에서 0.25 사이에 존재하는데, 0.15가 일반적이라고 보고되고 있다. Okoye (1970)에 의하면 와점성 계수는 폭-수심비에 크게 영향을 받으며, Lau and Krishnappan (1977)은 하상저항과 관련이 있음을 주장하였다. 직선형의 인공수로에서 와점성 계수는 0.24-0.3 사이의 값을 보였는데, 이는 실제 수로에서 수심의 변화 폭이 컸기 때문이다 (Fischer, 1967; Yotsukura and Cobb, 1972). Holley and Abraham (1973)은 수체가 있는 경우 직선구간이라도 와점성 계수가 0.35-0.5 사이에 있음을 보였다. 식생이 있는 구간에서 와점성 계수의 변화를 연구한 사례는 찾아보기 어렵다.

### 3. 무차원 와점성 계수의 검증

Fischer et al (1979)에 의하면 일반적인 개수로 흐름에서 무차원 와점성계수는 종방향, 횡방향, 연직방향으로 각각 0.15, 0.15, 그리고 0.067이다. 수심방향의 무차원 와점성 계수의 값은 타원형의 와점성계수의 분포를 가정하여 적분한 값과 동일하다. 한편, Darby and Thorne (1996)은 유량 횡분배법을 영국의 여러 하천에 적용하여 횡방향 무차원 와점성계수가 약 0.16임을 보였다. 본 연구에서는 수치실험을 통해 정수식생에서 횡방향 무차원 와점성계수의 값을 검증하였다.

식생흐름에서의 무차원 와점성 계수를 얻기 위해 Jordanova and James (2003)의 실험자료에 유동모형을 적용하였다. Jordanova and James (2003)은 소류사 이동에 있어 정수식생 (철제 실린더)의 영향을 연구한 것으로 크게 두 가지 조건에 대해 실험을 수행하였다. 즉, A Series는 유량을 고정시킨 상태에서 수심을 변화시켰고, B Series에서는 유량과 수심 모두를 변화시켰다. 실내 실험에서 식생을 구현하기 위해 직경이 0.005 m인 철제 실린더를 사용하였으며, 식생밀도는 모든 실험에서 동일하게  $8.2 \text{ m}^{-1}$ 로 엇갈린 형태로 바닥에 부착하였다.

표 1 에 다양한 흐름 조건과 수치실험을 통해 계산된 무차원 와점성 계수의 산정결과를 제시하였다. 실험에서 레이놀즈수의 범위는 3,400 - 19,000 로서 완전 난류 상태임을 알 수 있다 (특성 속도와 길이는 각각 단면평균 유속과 수심을 사용하였다). 표 2 에는 식생조건, 식생항력, 그리고 하상전단응력 등을 제시하였다. 전체 저항력을 산정하기위해 등류조건을 사용하였으며, 식생항력은 식 (3)을 이용하였고 하상전단응력은 두 힘의 차이이다. 전체 저항력 중에 하상전단응력은 약 20% 이하로 저항력의 대부분을 식생에 의한 항력이 차지하는 것을 알 수 있다.

그림 1 에 레이놀즈수에 따른 횡방향 무차원 와점성 계수를 도시하였다. 레이놀즈수가 증가함에 따라 와점성 계수가 감소하는 양상을 보인다. 계산된 와점성 계수는 B1 조건을 제외하고 0.016 - 0.164의 범위에 있으며 평균값은 0.062이다.

표 1. Jordanova and James (2003)의 실험조건과 횡방향 와점성 계수

Case	$q$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	H (cm)	$S_x$ (%)	$X_y$	Re
A1	0.0065	4.3	1.18	0.051	6,885
A2	0.0065	3.95	1.45	0.089	6,096
A3	0.0065	3.8	1.6	0.053	6,228
A4	0.0065	3.6	1.84	0.025	6,398
B1	0.0034	2.05	1.65	0.538	3,443
B2	0.0054	3.35	1.4	0.066	5,621
B3	0.0111	7.05	1.25	0.032	11,200
B4	0.0159	9.6	1.33	0.016	16,503
B5	0.0185	11.1	1.33	0.164	18,639

표 2. 식생항력 및 하상전단응력

Case	a (m <sup>-1</sup> )	C <sub>D</sub>	Vegetation resistance force (N/m <sup>2</sup> )	Bed shear stress (N/m <sup>2</sup> )	Total applied force (N/m <sup>2</sup> )	Bed/Total force (%)
A1	8.2	1.06	4.33	0.51	4.82	10.6
A2	8.2	1.06	4.73	0.74	5.44	13.6
A3	8.2	1.05	4.84	0.97	5.78	16.8
A4	8.2	1.03	5.02	1.32	6.3	21.0
B1	8.2	1.04	2.54	0.7	3.22	21.7
B2	8.2	1.05	3.84	0.63	4.46	14.1
B3	8.2	1.06	7.72	0.68	8.38	8.1
B4	8.2	1.04	11.46	0.69	12.14	5.7
B5	8.2	1.04	13.44	0.61	14.03	4.3
<b>Average</b>						<b>12.8</b>

Nepf et al. (2007)은 침수식생 흐름의 경우 하도 식생의 성기고 조밀한 정도를 다음 무차원 값으로 제시하였다.

$$H \approx 0.1 \tag{4}$$

Jordanova and James (2003)의 실험의 경우 무차원 수가 약 0.4로서 위의 값을 초과하여 식생에 의한 저항이 상당히 클 것으로 판단된다. 전술한 바와 같이 Nepf (1999)는 정수식생 조건에서 확산계수를 난류에 의한 확산과 기계적인 확산으로 구분하였고 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\frac{D}{U d} = \alpha (C_D a d)^{1/3} + \frac{\beta^2}{2} ad \tag{5}$$

여기서 D = 확산계수, U = 특성속도, d = 특성길이 (식생 직경), 그리고  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 크기가 O(1)인 상수이다. Jordanova and James (2003)의 실험조건을 위의 식에 대입해 보면 난류에 의한 확산계수가 0.34 그리고 기계적 확산에 의한 계수가 0.02 정도로 나타난다 (여기서,  $\alpha$ 와  $\beta = 1.0$ 을 사용하였다). 특성길이가 앞에서 산정된 무차원 와점성 계수와 약 10배 정도 차이가 남을 감안하면 검정된 와점성 계수의 값이 타당함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

정수식생 조건의 개수로 흐름은 연직방향으로 교환현상은 억제되는 반면 종/횡방향으로 이송이 지배적이게 된다. 이 경우 와점성계수는 비식생 조건에서와 크게 다를 것으로 예상되나 실험 혹은 수치계산에 의한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 논문에서는 문헌에 있는 실험연구 자료를 이용하여 정수식생 조건 개수로 흐름에서 횡방향 와점성 계수를 제시하였다. 유동계산을 위해서 식생항력 항이 추가된 유량 횡분배법을 이용하였다. 실험자료와 비교를 통하여 레이놀즈수에 따른 와점성계수의 변화를 제시하였으며, 평균은 0.062로서 일반 개수로 흐름에서의 값 (= 0.15)의 약 40%임을 확인하였다.

## 감 사 의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업인 “하천에서 유사이동 및 하상변동 예측을 위한 3차원 수치모형의 개발 (11기술혁신C04)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. Fischer, H.B. (1967). Transverse mixing in sand-bed channel, Professional Paper No. 575-D, US Geological Survey, D267-D272.
2. Holley, E.R. (1996). *Diffusion and dispersion, Environmental Hydraulics (Chapter 4) (edited by V.J. Singh and W.H. Hager)*, Kluwer Academic Publishers, The Netherland.
3. Holley, E.R. and Abraham, G. (1973). Field test on transverse mixing in rivers, *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, 99, 2313-2331.
4. Lau, Y.L. and Krishnappan, B.G. (1981). Modeling transverse mixing in natural stream, *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, 107, 209-226.
5. Nepf, H.M. (1999). Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. *Water Resources Research, AGU*, 35(2), 479-489.
6. Nepf, H.M., Ghisalberti, M., White, B., and Murphy, E. (2007). Retention time and dispersion associated with submerged aquatic canopies. *Water Resources Research, AGU*, 43, W04422, doi:10.1029/2006WR005362.
7. Yotsukura, N. and Cobb, E.D. (1972). Transverse diffusion of solutes in natural streams, Professional Paper No. 582-C, US Geological Survey, Washington DC, DC.

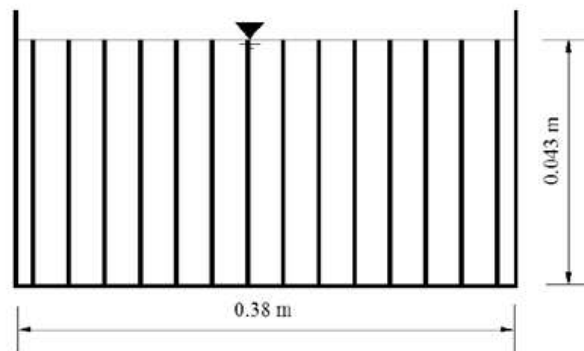


그림 1. Jordanova and James (2003)의 정수식생 흐름 실험 개요도

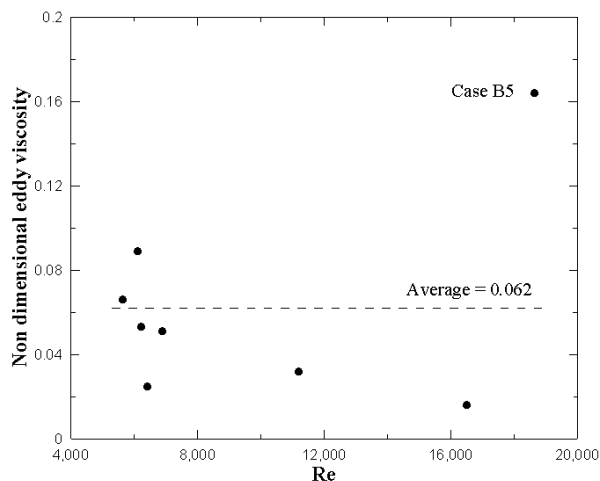


그림 2. 레이놀즈 수에 따른 횡방향 무차원 와점성 계수의 변화