

LES를 이용한 침수식생을 통과하는 난류흐름 수치모의

김형석*

¹한국건설기술연구원 수자원하천연구소

Numerical simulations of turbulent flow through submerged vegetation using LES

Hyung Suk Kim^{1*}

¹Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 본 논문에서는 침수조건의 식생이 식재된 개수로의 흐름 및 난류특성을 수치모의하였다. 이를 위해 여과된 Navier-Stokes 방정식을 수치해석 하였고 난류 모형으로 LES 모형을 이용하였다. 식생을 계산격자로 직접 고려하였고 이를 위해 직교격자 기반에 가상경계기법을 적용하였다. 수치모형을 이용하여 계산한 평균흐름을 Liu et al. (2008)의 수리실험 데이터와 비교하였고 평균오차 10%내에서 일치하는 것으로 나타났다. 식생영역과 비식생영역 사이에서 강한 와가 생성되는 것을 확인하였고 이는 횡방향에 걸쳐 발생하는 것으로 나타났다. 경계면에서 전단에 의해 유발된 난류는 후류에 의해 발생한 난류성분과 상호작용하여 최대값을 보였다. 전단에 의한 난류는 식생영역 흐름에 영향을 미쳤고 침투깊이는 식생 침수비가 커질수록 증가하였다. 이러한 난류흐름 특성은 식생영역에서 유사거동 메커니즘을 파악하는데 중요한 자료로 활용될 수 있다.

Abstract This study presents numerical simulations of mean flow and turbulence structure of an open channel with submerged vegetation. Filtered Navier-Stokes equations are solved using large-eddy simulation (LES). The immersed boundary method (IBM) is employed based on a Cartesian grid. The numerical result is compared with experimental data of Liu et al. (2008) and shows that simulated results coincided reasonably with experimental data within the average error of 10%. Strong vortices are generated at the interface between vegetated and non-vegetated regions with spanwise extent. The generation of turbulence induced by shear at the interface is interfered with wake turbulence, resulting turbulence intensity maximum. Turbulence produced by shear affects the flow in vegetated region and the penetration depth increases with an increase in the submergence ratio. This result can be used to understand sediment transport mechanisms in the vegetated region.

Keywords : flow, large-eddy simulation, shear, turbulence, vegetation

1. 서론

하천에서 식생은 수리학적 및 생태학적으로 중요한 역할을 한다. 식생은 흐름방향을 변화시키고 식생내의 평균흐름을 감소시킨다. 식생에 의한 추가적인 항력증가는 평균흐름 및 순간유속 분포, 난류량 그리고 유사이동

에 크게 영향을 미친다[1]. 흐름이 개수로 내의 부분 식생영역이나 침수 식생영역을 통과하는 경우에는 흐름방향, 횡방향 및 수직방향의 유속분포를 변화시키며 식생영역과 비식생영역 사이에 강한 전단층(shear layer) 발생으로 인해 이차류가 발생한다[2]. 이러한 복잡한 흐름 구조는 개수로 내의 유사이동에 영향을 미치고 결국 지

본 연구는 해양수산부의 해양과학기술사업 및 예비기술개발 사업가운데 연안이상현상(이상고파, 이안류) 발생원인규명 및 대응체계구축 R&D과제의 연구비지원에 의해 수행되었기에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Hyung Suk Kim(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

Tel: +82-31-910-0271 email: hskim0824@kict.re.kr

Received July 20, 2015

Revised (1st August 17, 2015, 2nd September 6, 2015)

Accepted September 11, 2015

Published September 30, 2015

형 변화를 야기할 수 있다[1,3]. 최근 식생을 이용한 자연형 하천복원 기술이 점점 중요해지고 있다. 그러므로 식생주변의 흐름특성에 관한 이해가 선행되어야하고 특히 복잡한 흐름거동을 나타내는 침수식생 주변의 평균흐름 및 난류구조에 관한 연구가 필수적이다.

일반적으로 하천의 흐름은 복잡한 3차원 흐름구조를 갖는다[2,4]. 특히 침수식생을 통과하는 경우 식생의 윗부분이 비식생영역으로 나타나는데 이때 식생영역 상단 근처에서 자유 전단층이 발생하여 변곡점이 유발되고 혼합층 흐름(mixing layer flow)이 형성된다[2,5]. 침수식생 주변의 복잡한 흐름을 파악하기 위해 다양한 3차원 난류모형들이 적용되어왔다. Shimizu and Tsujimoto[6]는 대수 응력모형(Algebraic Stress Model)을 이용하여 부분 식생영역이 존재하는 개수로 흐름을 수치모의하였고 식생이 존재하지 않는 복단면 개수로 흐름과 비교하여 그 차이점을 분석하였다. Fischer-Antze et al.[7]은 3D RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 모형과 표준 $k-\epsilon$ 모형을 사용하고 식생영향을 고려하기위해 운동방정식에 식생 항력항을 추가하여 침수식생을 통과하는 흐름을 수치모의하였고 평균흐름을 수리실험 결과와 비교하였다. 여기서 식생 항력계수는 실험에서 얻은 경험값을 사용하였다. Lopez and Garcia[8] 역시 RANS 모형과 표준 $k-\epsilon$ 모형을 이용하여 침수식생 조건의 개수로 흐름을 수치모의하여 평균유속, 난류강도 및 레이놀즈 응력을 실험데이터와 비교하였고 수치모형이 침수식생에 의한 흐름특성을 잘 재현함을 보였다. Naot et al.[9]은 RANS 모형과 고차 비등방성 난류폐합 모형 RSM(Reynolds Stress Model)를 이용하여 침수식생을 통과하는 흐름을 수치모의하였다. 식생영역에서는 등방성 모형을 이용한 결과와 크게 다르지 않았지만 식생영역 상단부터 비식생 영역에서 RSM 모형을 사용하여 얻은 평균흐름 및 난류분포가 등방성 모형의 결과보다 실험데이터와 잘 일치함을 보였다. Choi and Kang[10]은 RSM 모형을 이용하여 부분 식재된 개수로 흐름을 수치모의하였다. 이차류 강도 및 비등방성이 식생밀도와 밀접한 관련이 있으며 식생밀도가 증가할수록 이차류와 비등방성이 증가하였다. RANS 모형을 이용하여 식생이 식재된 개수로 흐름의 수치모의 결과들을 보면 시간평균 흐름을 잘 예측하는 것으로 나타났다. 그러나 RANS 모형을 이용하여 침수식생 조건의 흐름을 수치모의하는 경우 식생 상단근처에서 흐름 불안정에 의해 발생하는 3차

원 비정상 와 구조 및 이차류 등을 재현할 수 없다.

최근 컴퓨터 성능이 향상되어 식생이 식재된 개수로 흐름을 LES(large-eddy simulation)를 사용하여 수치모의가 수행되었다[11,12]. LES는 작은 와(eddy)만 모형화하고 나머지는 직접 계산하는 방법으로 식생과 비식생영역 사이에서 전단층에 의해 발생하는 복잡한 와 구조를 재현할 수 있다[5,11,12]. 국내에서는 RANS 모형에 식생항을 추가하여 경험적 항력계수를 사용하는 방법으로 침수식생을 통과하는 흐름에 관한 연구는 많이 진행되어왔으나 LES를 사용하고 식생을 수치격자로 직접 고려하여 흐름특성을 분석한 연구는 거의 없는 상황이다.

따라서 본 연구에서는 LES를 이용하여 끈고 휘어지지 않는 침수식생을 통과하는 난류흐름을 수치모의하고자 한다. 이를 위해 Liu et al.[13]의 침수식생조건의 개수로 실험에 적용하여 평균흐름을 비교하고 난류특성을 조사하였다. 추가적으로 침수식생의 침수비에 따른 흐름을 수치모의하여 흐름거동을 파악하고자 한다.

2. 지배방정식

LES는 Navier-Stokes 방정식을 필터링하여 유동장을 격자로 해석할 수 있는 성분과 그 보다 작은 성분으로 분리하여 격자보다 큰 와는 직접 계산하고 그 보다 작은 와는 모델화하여 해석하는 방법이다. 시간평균을 이용하지 않아 시간변동에 따른 비정상유동을 해석하여 난류의 통계적 특성을 분석할 수 있으며 미세난류 구조를 재현할 수 있기 때문에 실제형태에 가까운 결과를 얻을 수 있어 난류 메커니즘을 이해하는데 큰 도움을 준다.

본 연구에서 침수식생을 통과하는 비정상 3차원 난류 흐름을 수치모의하기 위해 LES를 사용하였다. Navier-Stokes 방정식을 공간에 대한 여과를 실시하여 얻은 연속방정식과 운동방정식은 다음과 같다.

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_j}} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (2\nu \overline{S_{ij}} - \tau_{ij}^{SC}) \tag{2}$$

여기서 t 는 시간, \overline{P} 는 수정 압력항, ρ 는 유체의 밀도, ν 는 물의 점성계수, $\overline{u_i}$ 와 $\overline{u_j}$ 는 여과 속도(filtered

velocity) 그리고 $\overline{S_{ij}}$ 는 여과 속도에 대한 변형률이다. $\overline{S_{ij}}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

Eq. (2)에서 τ_{ij}^{SG} 항은 사용된 계산격자로 직접 풀지 못한 와성분에 의해 나타난 비등방성 잔여 응력항(= $\overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}$) 이다. 이 비등방성 잔여 응력항 τ_{ij}^{SG} 은 Smagorinsky[14]가 제안한 방법을 사용하여 모형화 되고 다음 식과 같다.

$$\tau_{ij}^{SG} = -2\nu_t S_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} \quad (4)$$

$$\nu_t = (C_s \overline{\Delta})^2 |\overline{S}| \quad (5)$$

여기서, ν_t 는 난류점성계수, δ_{ij} 는 Kronecker delta, τ_{kk} 는 잔여 운동에너지, C_s 는 Smagorinsky 상수이며 본 연구에서는 동질 등방성 난류에서 사용할 수 있는 0.16을 사용하였다[15,16]. $|\overline{S}|$ 는 $\sqrt{2\overline{S_{ij}}\overline{S_{ij}}}$ 그리고 $\overline{\Delta}$ 는 필터의 크기를 나타낸다.

구성된 흐름 지배방정식은 유한체적법을 이용하여 모의하였고, Eqs. (1)과 (2)는 2차 정확도를 가진 two-step fractional step method를 적용하였다. 해석시간의 가속화를 위하여 시간에 대하여 2차 정확도를 가진 Adams-Bashforth-Crank-Nicolson method를 사용하였다. Eq. (2)에서 확산항은 Crank-Nicolson 방법을 이용하여 이산화하였고, 이류항은 2차 정확도를 가진 Adams-Bashforth 방법을 이용하여 이산화 하였다.

직교격자(Cartesian grid) 기반의 격자계를 사용하여 고체영역의 경계를 정확히 처리하기는 매우 어렵다. 본 연구에서는 별도의 격자계를 사용하지 않고 식생줄기를 고려하면서 주변의 유동을 해석할 수 있는 가상경계법 (Immersed boundary method)을 사용하였다. 가상경계법에 적용되는 보간법은 2차 정확도를 가지는 bilinear 보간법을 사용하고 이때 ghost-cell 방법을 이용한다.

3. 모형의 적용

3.1 적용대상

본 연구에서 침수식생을 통과하는 난류흐름을 수치모의하기 위해 LES모형을 Liu et al.[13]의 실험에 적용하였다. Liu et al. [13]은 사각형 직선 개수로에서 실내 수리실험을 수행하였다. 곧고 휘어지지 않는 식생으로 가정하여 원형 실린더를 수로 내에 엇갈림 배열로 고정하고 laser Doppler velocimeter(LDV)를 이용하여 6개 지점에서 순간유속을 측정하였다 (Fig. 1). 원형 실린더의 지름(D)은 6.35 mm이고 배열간격은 $10D$ 이다. 수심(h)은 0.114 m, 원형 실린더 길이(h_s)는 0.076 m로 수심과 원형 실린더 길이의 비는 1.5이다. 평균유속(u_{bulk})은 0.33 m/s로 레이놀즈 수는 약 38,000이다. 수치모의를 위한 계산 영역은 흐름 및 횡 방향으로 $10D$ 이고 수직방향으로는 수심에 상응하는 $18D$ 로 하였다 (Fig. 1). 계산영역 내에는 2개의 실린더를 배열하고 흐름 및 횡 방향으로 주기조건 (periodic condition)으로 설정하여 실린더가 무한히 배열되어 있는 것으로 하였다. 수치모의에 사용된 격자는 $256 \times 256 \times 256$ 으로 약 16,800,000개를 사용하였다.

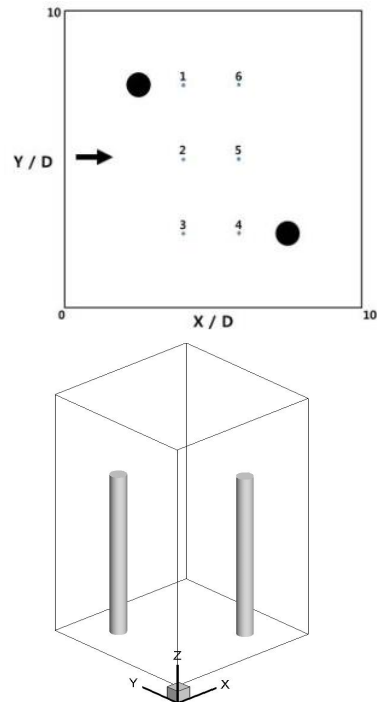


Fig. 1. Computational domain (upper) and computational box with two submerged cylinders (lower).

침수비(h/h_v) 변화에 따른 평균흐름 및 난류구조를 분석하기 위해 추가적인 수치모의가 수행되었다. 침수비가 1.25와 3.0인 조건에서 난류흐름을 수치모의하였다. 이 경우 수리학적 조건 및 수치모의 조건은 침수비가 1.5인 경우와 동일하게 하였다.

3.2 모의결과

일정한 간격으로 배열되어있는 침수조건 의 식생을 통과하는 난류 흐름구조는 단일 실린더 주변의 흐름 특성과 매우 다르다[5,17]. Fig. 2는 6개 지점에서 LES의 시간평균 흐름방향 유속을 수리실험 데이터와 비교한 것이다. 여기서 각 지점의 시간평균 유속은 평균유속(u_{bulk})으로 무차원화 되었다. 전반적인 유속분포는 식생영역 내에서 수직방향으로 거의 일정하지만 식생영역 상단 근처에서 유속의 변곡점이 발생한다. 비식생영역에서는 유속이 상당히 증가하고 쌍곡선 탄젠트 분포를 보인다. 이러한 흐름분포는 측정위치에 상관없이 동일하게 나타났다. 식생 직하류(location 1)에서 LES 결과를 보면 식생층의 유속이 과소 예측되었다. 이는 식생 하류에서 발생한 재순환 구간이 다소 과다하게 예측되었기 때문인 것으로 판단된다. 이 위치를 제외하고 다른 측정지점에서 평균 유속 분포는 수리실험 데이터와 잘 일치하는 것으로 나타나 LES모형이 침수식생을 통과하는 흐름특성을 잘 재현하는 것으로 판단된다. 수리실험과 수치모의 값의 비

교를 통해 얻은 오차율을 Table 1에 나타내었다. 식생을 따라 측정된 유속분포(location 1 과 6)를 보면 바닥근처에서 유속이 가속되고 있음을 보인다. 이는 식생에 의해 유발된 하강류에 의해 말굽형 와류(horseshoe vortex)가 발생하고 식생하류로 이동하여 모넨텀이 집중되어 전달되었기 때문이다. LES의 결과를 보면 바닥근처에서 증가한 유속을 잘 재현하는 것을 볼 수 있다.

Table 1. Percent error for the streamwise velocity

Position	Error(%)
location 1	45.1
location 2	3.37
location 3	3.5
location 4	3.6
location 5	3.65
location 6	4.2
Average	10.5

3.3 침수비 조건에 따른 흐름특성

침수식생을 통과하는 흐름은 식생의 밀도 및 침수비에 따라 특성이 변화한다. 본 연구에서는 Liu et al. [13]의 수리실험 조건 이외에 2가지 침수비 조건에서 수치모의를 수행하고 평균흐름과 난류특성을 비교분석 하였다.

Fig. 3은 식생의 중심과 식생 사이의 축을 따라 발생하는 무차원 시간평균 유속분포를 도시하였다. 침수비 조건에 따른 영향을 검토하기 위해 침수비(h/h_v)가 3.0

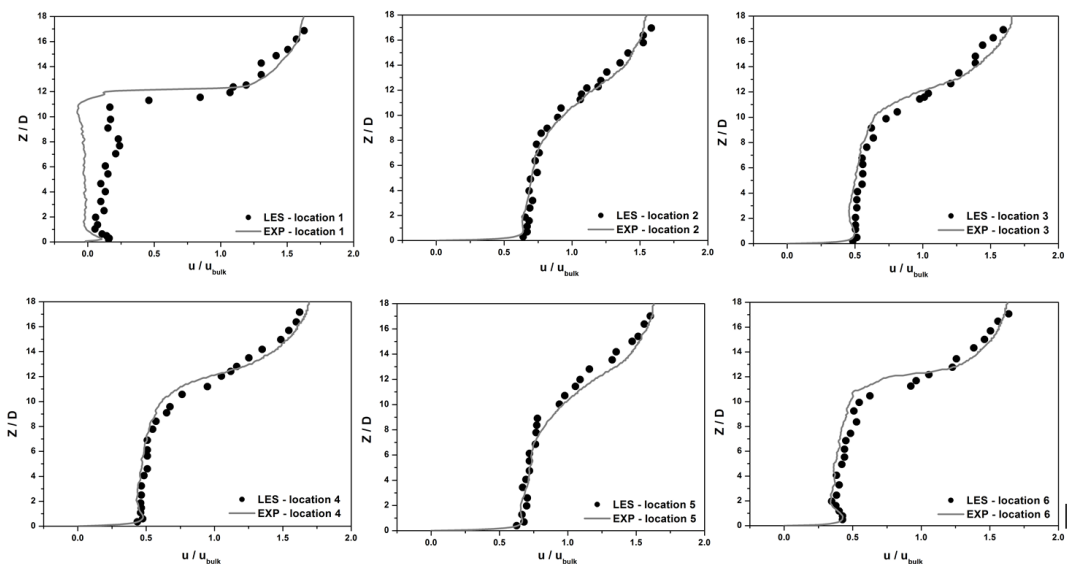


Fig. 2 Time-averaged streamwise velocities of the LES with the measurements at six selected locations.

(좌측), 1.5(중간) 그리고 1.25(우측)를 함께 나타내었다. 식생 중심축을 따라 발생한 유속분포를 보면 식생영역에서는 식생저항에 의해 유속이 상당히 감소하고 비식생영역에서는 유속이 크게 증가하고 있음을 보인다. 이러한 특징은 침수비가 증가할수록 더욱 뚜렷이 나타난다. 침수비에 관계없이 식생 높이에 걸쳐 직하류 부분에서 재순환 구간이 나타나고 있다. 식생 사이의 축을 따라 발생하는 유속분포는 식생 직하류의 재순환 구간을 제외하면 식생을 따라 발생하는 유속분포와 유사하게 나타났다. 특히 침수비가 1.25와 1.5인 경우 식생 사이에서 유속분포는 식생이 없음에도 불구하고 유속차이가 분명히 나타났다. 이러한 흐름특성은 침수식생이 식재된 전단면에 걸쳐 강한 전단층이 발생하고 있음을 의미한다. 이러한

전단층 발생은 식생영역과 비식생영역 사이에서 비정상 고유구조(coherent structure)가 주기적으로 유발될 수 있다. 이로 인해 식생층과 비식생층 사이에서 운동량 교환이 크게 발생한다.

Fig. 4는 침수비의 변화에 따른 순간 와도 (instantaneous vorticity) 분포이다. 순간 와도분포를 보면 식생 하류에서 흐름분리(separation)에 의해 재순환 영역에 von Karman 와류가 발생하고 있다. 식생하류에서 발생하는 와류의 강도는 식생의 침수비가 감소할수록 점점 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 침수비가 감소하면 식생영역을 통과하는 유량이 증가하기 때문이다. 식생에 의해 유발된 와류는 하류로 이동하고 더 하류에 위치한 식생의 접근흐름에 영향을 미친다. 사실 본 연구

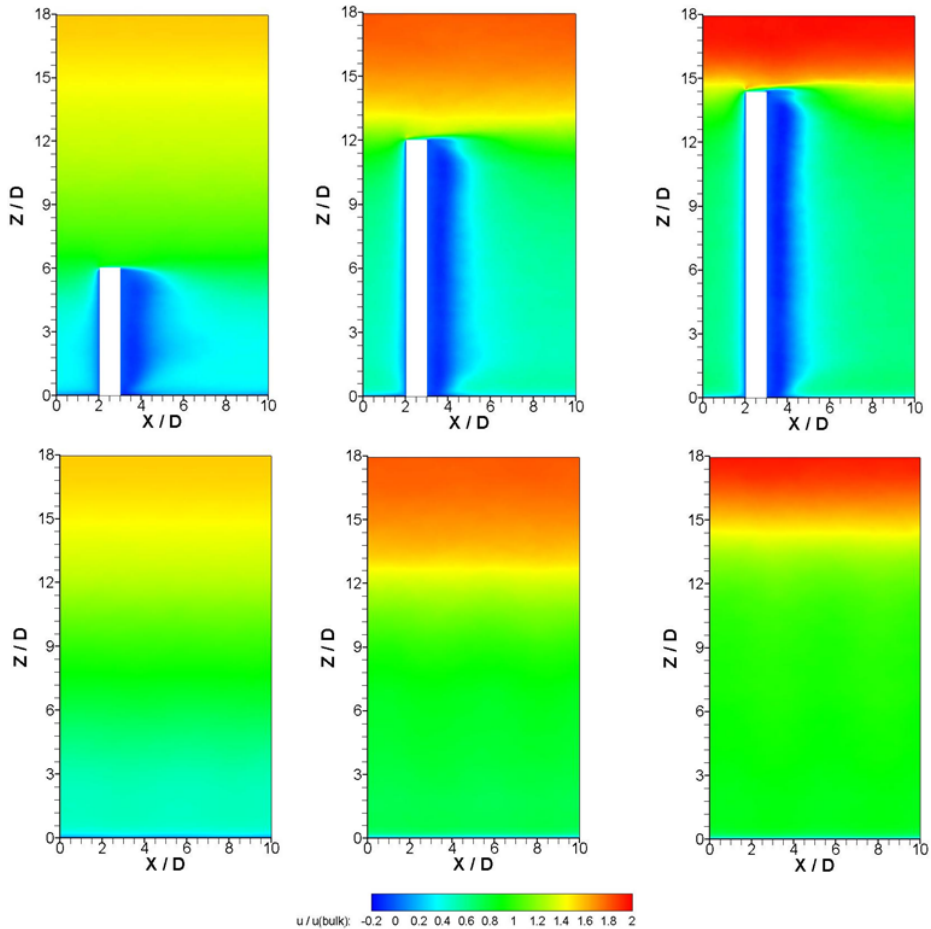


Fig. 3 Time-averaged flow in two selected longitudinal planes; slice through the cylinder axis(upper) and slice between cylinders(lower part). The left part presents $h/h_v=3.0$, the middle part presents $h/h_v=1.5$ and the right part presents $h/h_v=1.25$.

에서는 식생이 무한히 존재한다는 가정 하에 흐름 및 횡 방향에 주기경계조건을 부여하였기 때문에 상류식생 또는 하류식생이 존재하지 않는다. 이와 같이 침수식생 하류부에서 발생하는 von Karman 와류는 정수식생에서 발생하는 현상과 같다. 하지만 침수식생의 경우에는 정수식생과 다르게 식생영역과 비식생영역의 유속차에 의해 자유 전단층이 형성되고 Kelvin-Helmholtz 불안정이 발생하여 조직 와(organized vortex)를 유발한다[2]. Ikeda and Kanazawa[18]는 흐름방향으로 동시에 구르며 이동하는 듯한 와를 조직 와라고 하였다. Fig. 4를 보면 식생의 상부에서 전단층 발생에 의해 강한 와류가 발생하고 있다($Z/D=6;h/h_v=3.0$, $Z/D=12;h/h_v=1.5$, $Z/D=14;h/h_v=1.25$). 식생 상부에서 유발된 와류는 흐름 방향으로 이동하면서 조직 와가 형성되는 것으로 나타났고 다음 식생 주변의 흐름에 영향을 미쳤다. 이러한 현상은 주기적으로 반복하여 나타났다. 또한 식생 상부에서 유발된 와류는 von Karman 와류와 상호작용하여 더욱 복잡한 흐름거동을 야기하였다. 식생 상부의 강한 전단층 내에서는 조직 와의 이동에 의해 흐름방향으로 난류 유속성분의 쓸기(sweep)와 분출(ejection)이 반복적으로 발생한다. 이로 인해 수직방향으로 흐름 재분배가 나타나 상당한 운동량 교환이 발생한다. 이와 같이 조직 와의 발생은 식생 높이 근처에서 파동형태를 이룬다[2,19].

Fig. 5는 식생의 중심과 식생 사이의 축을 따라 발생하는 난류운동에너지(turbulence kinetic energy, TKE)

분포를 도시하였다. 난류운동에너지는 평균 유속의 제곱값으로 무차원화 되었다. Fig. 5에서 식생의 중심축을 따라 도시된 난류운동에너지 분포를 보면 식생에 의해 유발된 후류와 식생 상단부 근처에서 전단층에 의해 생성되는 난류성분이 지배적이다. Nepf and Vivoni[20]는 실내 수리실험을 통하여 정수식생의 경우에는 전단에 의한 난류성분은 발생하지 않으며 대부분은 후류에 의해 발생한다고 하였다. 이때 식생 하류부의 난류운동에너지 분포는 수심방향으로 일정한 값을 갖는다. 하지만 본 연구에서 수행된 침수식생에서 난류운동에너지 생성은 수심방향으로 상당히 크게 변화하였다. 특히 식생영역과 비식생영역 사이에서 강한 난류운동에너지가 발생하는 것으로 나타났고 최대값은 식생영역보다 약간 낮은 곳에서 발생하였다. 후류에 의한 난류운동에너지뿐만 아니라 전단에 의해 발생한 난류운동에너지가 식생의 침수비가 감소할수록 증가하였다. 정수식생의 난류운동에너지 분포와 다르게 침수식생의 경우에는 식생 하류부에서 발생한 난류운동에너지는 수심방향으로 점점 증가하는 것으로 나타났다. 식생 상단 근처에서는 Fig. 4에서 설명한 바와 같이 자유 전단층 형성에 의한 조직 와가 발생하여 흐름 방향으로 이동하고 이때 식생영역과 비식생영역 사이의 흐름 재분배가 발생하여 운동량 교환이 활발히 발생한다. 이로 인해 전단에 의해 발생한 난류성분과 후류에 기인하는 난류성분이 상호작용하여 자유 전단층 근처에서 난류운동에너지 성분이 증폭한 것으로 보인다. 식생 사

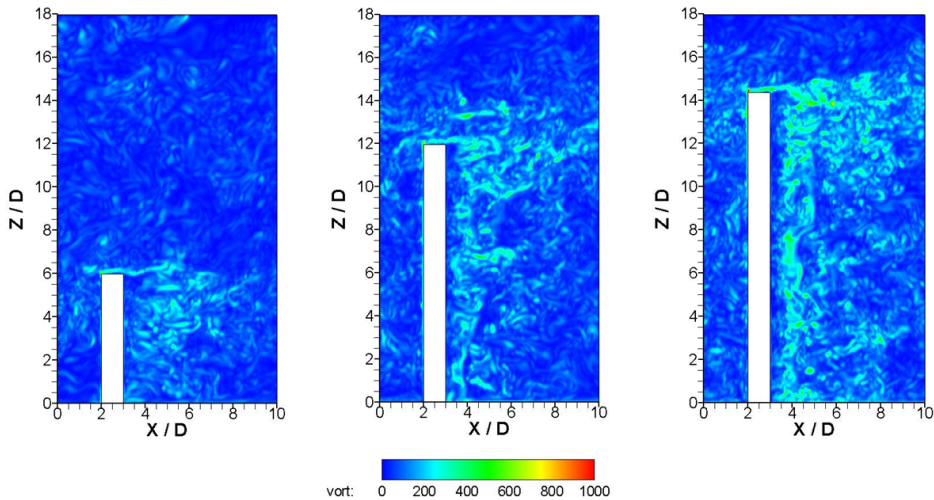


Fig. 4 Distribution of instantaneous vorticity through a slice of the cylinder axis; $h/h_v=3.0$ (left part), $h/h_v=1.5$ (middle part) and $h/h_v=1.25$ (right part)

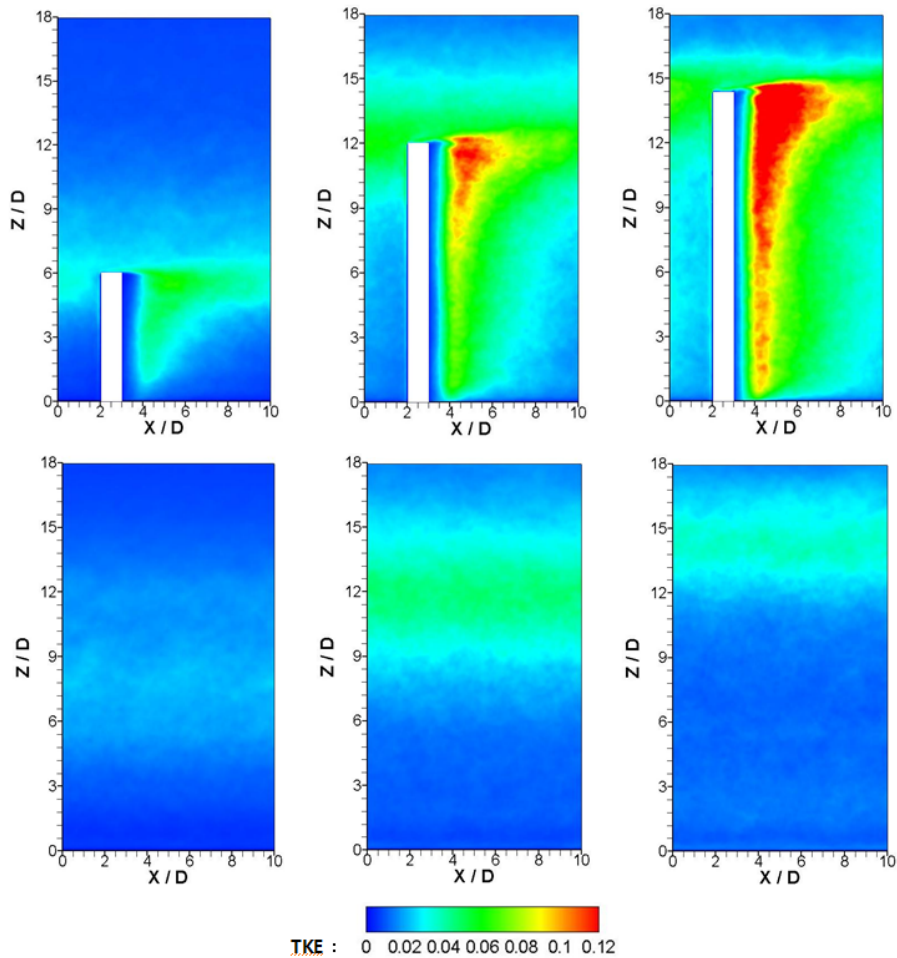


Fig. 5 Distribution of turbulence kinetic energy(TKE); slice through the cylinder axis(upper) and slice between cylinders(lower part). The left part presents $h/h_v=3.0$, the middle part presents $h/h_v=1.5$ and the right part presents $h/h_v=1.25$.

이의 축을 따라 발생하는 난류운동에너지 분포를 보면 식생영역과 비식생영역의 경계를 중심으로 난류운동에너지가 증가하였다. 침수비가 3.0인 경우에는 난류운동에너지가 $Z/D=5.0\sim 9.0$ 사이에서 증가하였다. 또한 침수비가 1.5인 경우에는 $Z/D=9.0\sim 15.0$ 에서 침수비가 1.25인 경우에는 $Z/D=12.0\sim 16.0$ 에서 난류운동에너지가 증가하였다. 증가된 난류운동에너지의 범위는 침수비가 1.5인 경우에 가장 크게 나타났다.

침수식생을 통과하는 흐름에서 난류운동에너지는 두 영역에서 증가하는 모습이 뚜렷이 나타났다. 첫 번째 영역은 von Karman 와류가 발생하는 재순환 영역이다. 후류에 의한 난류는 침수비가 감소함에 따라 증가하였다.

두 번째 영역은 식생과 비식생영역의 경계이다. 이 영역에서는 두층의 유속 차이에 의해 강한 전단층이 발생하고 조직 와가 발생한다. 비식생영역에서 발생한 흐름이 식생영역으로 침투하여 상호작용하는 동시에 흐름방향으로 이동한다. 이로 인해 식생에 의해 증가된 난류성분이 더 하류에 위치한 식생에 영향을 미친다.

Fig. 6은 침수비의 변화에 따른 레이놀즈 응력 분포를 도시하였다. 이 결과는 Location 3에서 레이놀즈 응력이며 평균유속의 제곱으로 무차원화 되었다. 또한 정수식생의 레이놀즈 응력 분포와 비교하기 위해 $h/h_v=1.0$ 의 결과를 함께 도시하였다.

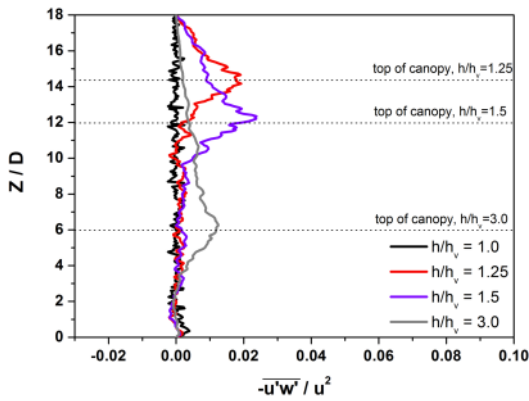


Fig. 6. Effect of submergence ratio on Reynolds stress $-\overline{u'w'}/u^2$.

정수식생의 레이놀즈 응력은 침수식생의 레이놀즈 응력에 비해 매우 작고 거의 무시할만한 값을 보인다. 이는 정수식생의 경우 전단층이 발생하지 않고 후류 의한 난류가 발생하기 때문이다. 이러한 결과는 Nepf and Vivoni[20]의 수리실험 결과와 일치한다. 반면 식생이 침수되면 식생상부 근처에서 수직방향으로 운동량 교환이 발생하기 때문에 레이놀즈 응력이 식생영역과 비식생영역 경계에서 최대값을 보인다. 레이놀즈 응력은 침수비가 감소할수록 증가하는 경향을 보였지만 침수비가 1.25와 1.5인 경우에는 유사한 최대값을 보였다. 경계면에서 최대 레이놀즈 응력 값을 보였지만 식생영역 내에도 레이놀즈 응력 값이 정수식생보다 크게 발생하는 구간이 나타났다. 이는 전단층에서 유발된 조석 와 등에 의해 수직방향으로 모멘텀이 발생하기 때문이다.

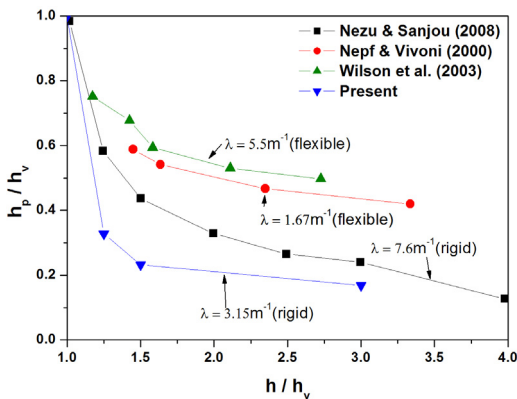


Fig. 7 Penetration depth h_p according to submergence ratio.

식생영역과 비식생영역 사이에서 발생하는 수직방향 운동량 교환은 유체의 흐름과 식생의 특성에 영향을 받는다[21]. 자유 전단층에서 이동하는 흐름은 식생영역의 흐름에 영향을 미치고 그 범위는 레이놀즈 응력과 관련이 있다[20-22]. Nepf and Vivoni[20]는 전단층에 의해 유발된 흐름이 식생영역 내에 침투하는 깊이(h_p)를 식생영역 경계로부터 레이놀즈 응력 최대값의 10%가 되는 지점까지로 정의하였다. Fig. 7은 침수비 변화에 따른 침투깊이(h_p)를 도시하였다. 침투깊이는 침수비가 증가함에 따라 점점 커지고 일정 침수비가 지나면 더 이상 변화하지 않았다. 이는 이전의 수리실험 데이터[20,21]와 일치한다. 본 연구의 수치모의 조건과 같은 끈고 휘어지지 않는 식생을 이용한 Nezu and Sanjou[21] 결과는 같은 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 전반적으로 더 작은 침투깊이를 나타내고 있는데 이것은 식생밀도 차이에 의한 것으로 판단된다. 본 연구에서 적용된 식생밀도는 3.15 m^{-1} 로 Nezu and Sanjou[21]가 사용한 7.6 m^{-1} 보다 작다. 추가적으로 유연한 식생의 결과와 비교하였다. Nepf and Vivoni[20]의 실험에서는 1.67 m^{-1} 의 식생밀도를 사용하였고 Wilson et al. [22]은 5.5 m^{-1} 의 식생밀도를 사용하였다. 유연한 식생을 이용한 결과를 보면 휘어지지 않는 식생조건의 결과와 같이 침수비가 증가하면 침투깊이가 점점 증가하는 경향을 보였다. 그러나 유연한 식생의 경우가 침투깊이가 작게 나타났는데 이는 수직방향으로 운동량 교환이 유연한 식생의 경우가 더 작게 발생하고 있음을 의미한다. 유연한 식생인 경우 휘어지는 영향에 의해 운동량 교환이 억제되어 침투깊이가 작게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 유연한 식생의 결과도 낮은 식생밀도 조건에서 더 큰 침투깊이를 나타내므로 식생밀도가 침투깊이와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 LES 모형을 이용하여 침수식생을 통과하는 난류흐름을 수치모의 하였다. LES 모형에 의한 수치모의 결과를 Liu et al. [13]의 실험결과와 비교하여 적용성을 확인하고 침수비 변화에 따른 평균흐름 및 난류특성들을 분석하였다. 침수식생을 통과하는 흐름은 식생영역에서 유속이 감소하고 비식생영역에서 유속이 크

게 증가하였다. 식생영역과 비식생영역의 유속차에 의한 변곡점 발생은 자유 전단층을 유발하였고 두 영역사이에 강한 와류의 생성을 야기하였다. 이 와류는 하류로 이동하였고 다음 식생의 흐름에 영향을 미쳤다. 침수식생을 통과하는 흐름에서는 두 영역에서 강한 난류운동에너지가 발생하였다. 식생 직하류에서 후류에 의해 난류가 생성되었고 식생영역과 비식생영역 사이에서 전단에 의한 난류가 발생하였다. 두 영역사이에서 발생한 와는 하류로 이동하고 식생영역에서 발생하는 난류성분과 상호작용하여 경계면에서 가장 큰 난류강도가 나타나는 것을 확인하였다. 경계면에서 수직방향으로 운동량 교환으로 인해 식생영역 내의 레이놀즈 응력 본분에 영향을 미쳤고 그 침투깊이는 식생의 침수비가 커질수록 점점 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 수리실험 데이터의 경향과 일치하는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 침수식생역을 통과하는 난류흐름 특성을 수치모의하였다. 이러한 결과는 향후 식생역주변의 오염물질 확산 및 유사기동 메커니즘을 파악하는데 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] H. S. Kim, I. Kimura, Y. Shimizu, "Bed morphological changes around a finite patch of vegetation.", *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 40, No. 3, pp. 375-388, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3639>
- [2] H. Kang, S. U. Choi, "Numerical Investigations of Streamwise Vortical Structures in Fully Vegetated Open-Channel Flows.", *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 27, No. 3B, pp. 289-299, 2007.
- [3] M. Tal, C. Paola, "Dynamic Single-Thread Channels maintained by the Interaction of Flow and Vegetation.", *Geology*, Vol. 35, No. 4, pp. 347-350, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1130/G23260A.1>
- [4] S. Choi, S. U. Choi, T. Kim, "Numerical Simulation of Mean Flows and Turbulent Structures of Partly-Vegetated Open-Channel Flows using the Non-linear k-ε Model.", *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 34, No. 3, pp. 813-820, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2014.34.3.0813>
- [5] T. Stoesser, G. Palau, W. Rodi, P. Diplas, "Large Eddy Simulation of Turbulent Flow Through Submerged Vegetation.", *Transport in Porous Media*, Vol. 78, pp. 347-365, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11242-009-9371-8>
- [6] Y. Shimizu, T. Tsujimoto, "Numerical analysis of turbulent open channel flow over vegetation layer using k-ε turbulence model.", *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 59-67, 1994.
- [7] Fischer Antze, T. Stoesser, T. Bates, N. R. Olsen, "3D numerical modeling of open-channel flow with submerged vegetation.", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, pp. 303-310, 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00221680109499833>
- [8] F. Lopze, M. Garcia, "Mean flow and turbulence structure of open-channel flow through non-emergent vegetation.", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 5, pp. 392-402, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:5\(392\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:5(392))
- [9] D. Naot, I. Nezu, H. Nakagawa, "Hydrodynamic behavior of partly vegetated open-channels.", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 122, No. 11, pp. 625-633, 1996.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:11\(625\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:11(625))
- [10] S. Choi, H. Kang, "Numerical investigations of mwan flow and turbulence structures of partly-vegetated open channel flows using the reynolds stress model.", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 55, No. 2, pp. 203-217, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2006.9521676>
- [11] J. Cui, V. S. Neary, "Large eddy simulation of fully developed flow through vegetation." *Proc. of 5nd IAHR International conference on hydroinformatics*, Cardiff, 2002.
- [12] T. Stoesser, S. J. Kim, P. Diplas, "Turbulent flow through idealized emergent vegetation.", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, No. 12, pp. 1003-1017, 2010.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000153](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000153)
- [13] D. Liu, P. Diplas, J. D. Fairbanks, C. C. Hodges, "An experimental study of flow through rigid vegetation.", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, F04015, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2008JF001042>
- [14] J. Smagorinsky, "General circulation experiments with the primitive equations, Part I: The basic experiment.", *Monthly Weather Review*, Vol. 91, pp. 99-152, 1963.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2)
- [15] E. Leveque, F. Toschi, L. Shao, J. P. Bertoglio,

- “Shear-improved Smagorinsky model for large-eddy simulation of wall-bounded turbulent flows.”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 570, pp. 497-502, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112006003429>
- [16] D. K. Lilly, “A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method.”, *Physics of Fluids A*, Vol. 4, pp. 633-635, 1992.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.858280>
- [17] G. P. Palau, T. Stoesser, A. Rummel, W. Rodi, “Turbulent shallow flow through emergent vegetation.”, *Proc. of International conference on ecohydraulics*, Tempe, 2007.
- [18] S. Ikeda, N. Kanazawa, K. Ohta, “Flow over flexible vegetation and 3D structure of organized vortex associated with honami.”, *Journal of Hydraulic, Coastal and Environmental Engineering*, Vol. 515, pp. 33-43, 1995.
DOI: http://doi.org/10.2208/jscej.1995.515_33
- [19] M. Ghisalberti, H. M. Nepf, “Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows.”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, 3-1-3-11, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2001JC000871>
- [20] H. M. Nepf, E. R. Vivoni, “Flow structure in depth-limited, vegetated flow.”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, pp. 28547-28557, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2000JC900145>
- [21] I. Nezu, M. Sanjou, “Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows.”, *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 2, pp. 2, pp. 62-90, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jher.2008.05.003>
- [22] C. A. M. E. Wilson, T. Stoesser, P. Bates, A. B. Pinzen, “Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation.”, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, pp. 847-853, 2003.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:11\(847\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:11(847))

김형석(Hyung Suk Kim)

[정회원]



- 2009년 2월 : 한양대학교, 토목공학과 (공학석사)
- 2010년 4월 ~ 2010년 9월 : Hokkaido University, Graduate School of Engineering(연구원)
- 2013년 12월 : Hokkaido University, Graduate School of Engineering (공학박사)
- 2013년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수자원하천연구소 박사후연구원

<관심분야>

토목공학, 수리학, 하상변동