

교행식생 영역을 갖는 개수로 흐름에서의 3차원 수치모의

Three-Dimensional Numerical Simulations of Open-Channel Flows with Alternate Vegetated Zones

강형식* · 김규호** · 임동균***
Kang, Hyeongsik · Kim, Kyu-Ho · Im, Dongkyun

Abstract

In the present paper, turbulent open-channel flows with alternate vegetated zones are numerically simulated using three-dimensional model. The Reynolds-averaged Navier-Stokes Equations are solved with the $k-\epsilon$ model. The CFD code developed by Olsen(2004) is used for the present study. For model validation, the partly vegetated channel flows are simulated, and the computed depth-averaged mean velocity and Reynolds stress are compared with measured data in the literature. Comparisons reveal that the present model successfully predicts the mean flow and turbulent structures in vegetated open-channel. However, it is found that the $k-\epsilon$ model cannot accurately predict the momentum transfer at the interface between the vegetated zone and the non-vegetated zone. It is because the $k-\epsilon$ model is the isotropic turbulence model. Next, the open channel flows with alternate vegetated zones are simulated. The computed mean velocities are compared well with the previously reported measured data. Good agreement between the simulated results and the experimental data was found. Also, the turbulent flows are computed for different densities of vegetation. It is found that the vegetation curves the flow and the mean-dering flow pattern becomes more obvious with increasing vegetation density. When the vegetation density is 9.97%, the recirculation flows occur at the locations opposite to the vegetation zones. The impacts of vegetation on the flow velocity and the water surface elevation are also investigated.

Keywords : alternate vegetated channel, partly vegetated channel, $k-\epsilon$ model, mean velocity, water elevation

요 지

본 연구에서는 흐름방향으로 식생 영역이 교차적으로 식재된 교행식생 수로에서의 3차원 수치모의를 수행하였다. 지배방정식에서의 난류 폐합을 위해 $k-\epsilon$ 모형을 적용하였으며, 수치모형은 Olsen(2004)이 개발한 3차원 모형을 이용하였다. 먼저, 3차원 수치모형을 이용하여 하상의 일부가 식재된 부분 식생 수로를 수치모의 하고, 계산된 적분유속 및 레이놀즈응력을 기존의 실험 결과와 비교하였다. 그 결과 본 모형이 식생 수로에서의 평균 유속 분포를 매우 잘 예측하는 것으로 나타났다. 그러나 $k-\epsilon$ 모형이 등방성 모형이므로 식생과 비식생 영역의 경계면 부근에서 발생하는 운동량 교환 효과를 정확히 예측할 수 없는 것으로 나타났다. 한편, 주흐름방향으로 식생 영역이 교차적으로 존재하는 교행식생 수로를 수치모의 하고, 계산된 유속 분포를 기존의 실험 결과와 비교한 결과, 계산 유속과 실험 결과가 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한 다양한 밀도에 따른 유속 벡터도를 계산한 결과, 식생 밀도가 증가함에 따라 식생이 흐름 방향을 변화 시켜 점차 만곡수로와 유사한 형태의 유속 벡터도를 갖는 것으로 나타났으며, 식생 밀도 α 가 9.97%인 경우에는 식생 반대 측벽 영역에서 재순환 흐름이 형성되는 것으로 나타났다. 한편, 식생 밀도에 따른 단면 유속 분포도 및 편수위 변화를 살펴보았다.

핵심용어 : 교행식생 수로, 부분식생 수로, $k-\epsilon$ 모형, 평균유속, 수위

1. 서 론

지금까지 식생수로에서 식생이 흐름 구조 및 유사이동에 미치는 영향과 관련하여 많은 수치모의 및 실내 실험 연구가 수행되어 왔다. 이들 연구의 주된 결과는 1) 식생 항력의 직접적인 원인으로 인한 유속 감소, 즉 식생 영역에서는 바닥 전단력이 감소되고 항력의 증가로 인한 형상항력이 증

가되어 전체 저항력 증가(최성욱과 강형식, 2007; Tsujimoto, 1999), 2) 식생 높이에서 강한 비등방성 난류 발생 및 유속 차에 의한 강한 전단층(free shear layer) 형성, 또한 Kelvin-Helmholtz 불안정이 발생되며 조직渦(organized vortex)에 의해 식생 높이가 흐름 방향으로 웨이브 형태를 취하게 되는 등의渦와 식생의 상호 운동인 모나미(monami) 현상 발생(Ikeda와 Kanazawa, 1996; Ackerman과 Okubo, 1993;

*정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 하천 · 해안항만연구실 박사후연구원(E-mail : kanghs@kict.re.kr)

**정회원 · 한국건설기술연구원 하천 · 해안항만연구실 책임연구원 (E-mail : khkim1@kict.re.kr)

***정회원 · 한국건설기술연구원 하천 · 해안항만연구실 연구원 (E-mail : himdk@kict.re.kr)

Choi와 Kang, 2004; Shimizu와 Tsujimoto, 1994; Lopez와 Garcia, 2001), 3) 식생이 이차흐름 구조에 영향을 미치게 되며 특히 하폭 전체에 식생이 식재된 경우 바닥 渦의 크기가 수심과 거의 동일하게 되며, 바닥 渦에 의해 측면 근처에서도 최대 유속이 발생 되고, 횡방향으로 웨이브 형태의 유속 분포가 형성되어 결국 횡방향 부수로(lateral subchannel) 발생(강형식과 최성욱, 2007; Ghisalberti와 Nepf, 2002), 4) 수로 일부분이 식재된 부분 식생 수로의 경우 새로운 형태의 이차흐름이 형성되고, 식생과 비식생 영역의 경계면에서 유속 차에 의해 난류량의 크기가 증가되며 식생과 비식생 사이의 운동량 교환 효과 증가(Choi와 Kang, 2006; Nezu와 Onitsuka, 2001), 또한 식생과 비식생에서의 자유 전단층으로 인한 수평면 渦(Horizontal vortex) 발생(Nezu와 Onitsuka, 2001; Xiaohui와 Li, 2002), 5) 일반 개수로에서의 난류 슈미트 수는 약 1.0으로서 운동량과 스칼라의 확산이 거의 동일하지만 식생 수로의 경우에는 약 0.5이며, 스칼라의 확산이 운동량 확산 보다 2배 정도 더 크게 발생(Kang와 Choi, 2008; Ghisalberti and Nepf, 2005), 6) 또한 식생 영역 주변에서의 유사 퇴적(Tsujimoto와 Kitamura, 1996; Tsujimoto, 1999) 등의 많은 연구 결과가 발표되었다. 즉, 이상의 연구 결과를 요약하면 식생에 의한 항력의 증가로 인해 유속 차이가 커져 강한 전단층, 비등방성 난류, 새로운 형태의 渦 구조가 형성되며, 특히 식생 수로는 경계층(boundary layer) 흐름이 아닌 혼합층(mixing layer) 흐름에서의 스칼라 확산 특성을 갖는다 등의 주로 식생에 의한 미세흐름 구조 변화에 중점을 두었다.

본 연구에서는 식생 군집이 공간상에 교차적으로 놓여 있는 개수로 흐름에서의 식생에 의한 흐름방향 변화에 초점을 맞추었다. 일반적으로 식생은 하천 복원에 있어 중요한 재료로 사용된다. 특히 임의 하천에 식생 군집을 공간상에 지그재그 형태로 분포시켰을 경우, 직선으로 흐르는 하천을 만곡으로 흐르게 할 수 있을 뿐만 아니라 하천 공간에서 발생하는 유속 범위를 풍부하게 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 환경 기능이 저하된 하천에 식생을 식재할 경우 다양한 유속 및 수심 범위가 형성되어 하천 생물 종의 다양성을 기대할 수 있을 것으로 보이며, 식생 뒷공간은 생물의 서식처 및 은신처를 제공할 수 있을 것으로 보인다. 이와 같이 공간상의 식생 군집에 의한 흐름 특성 변화를 수치모의 하기 위해서는 수심적분 2차원 모형이나 3차원 모형이 필요하다. 수심적분 2차원 모형을 이용하여 식생 수로를 수치모의한 사례로는 Tsujimoto(1999), Wu와 Wang(2004) 등이 있으며, 국내에서는 김태범 등(2007)이다. Tsujimoto(1999)는 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 식생 수로에서의 흐름 분포 및 하상변동 영향에 대해 수치모의하였다. 그러나 Tsujimoto(1999)의 2차원 모형에서는 식생 높이가 수심과 동일한 정수식생(emergent vegetation) 조건에 대해서만 모의가 가능하다. 즉, 식생 수로에서는 식생 밀도가 증가함에 따라 바닥 전단응력은 감소되며, 식생 높이 부근에서의 전단응력은 증가하게 된다. 따라서 수심적분 모형을 이용하여 식생 수로를 수치모의 하기 위해서는 전체 저항에서 식생 항력과 전단력을 분리하여 수치모의해야 한다. 한편, Wu와 Wang(2004) 역시 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 식생 수로에 대한 수심적분 2차원 모

형을 개발하였다. 특히, 이들의 모형은 Stone과 Shen(2002)이 제시한 식생 영역에서의 유속과 전체 수심에 대한 유속 분포식을 이용하여 침수식생 수로에서의 모의도 가능하다. 그러나 모형의 검증에서 사용된 실험 조건이 모두 정수식생 수로에 대한 것으로서 식생의 침수비에 대한 모의는 수행되지 않았다. 최근 국내에서 김태범 등(2007)은 Wu와 Wang(2004)과 마찬가지로 Stone과 Shen(2002)의 적분 유속 산정 방법에 근거하여 침수식생(submerged vegetation) 수로에 대한 2차원 적분 모형을 개발하였다. 그러나 아직까지 모형의 적용성 및 정확성을 위해서는 좀 더 많은 연구가 필요할 것으로 보인다. 한편, 현재까지 식생 수로에 대한 3차원 모형 연구의 대부분은 주로 주흐름방향으로 흐름 변화가 없는 등류 상태의 3차원 모형을 이용하였으며(Shimizu와 Tsujimoto, 1993; Naot 등, 1996; Fischer-Antze 등, 2001; Choi와 Kang, 2006; Kang와 Choi, 2006 등), 식생 수로에서의 부등류 흐름 조건에 대한 3차원 수치모의 연구는 극히 드문 것으로 나타났다. 한편, 최근에는 침수식생 조건을 갖는 수로에서의 渦 구조를 살펴보기 위해 큰 渦수치모의(LES: Large Eddy Simulation)를 이용하여 수치모의하였으나(Cui와 Neary, 2008; Kanda와 Hino, 1994), LES는 큰 渦에 대한 순간유속장을 직접 수치모의하는 것이기 때문에 모형의 적용성에는 한계가 있다. 또한 본 연구의 최종 목적은 실험실 수로 및 실제 하천에 식생 군집에 의한 흐름 특성 변화 및 이에 따른 하상변동을 예측하는 것이고, 본 연구는 이에 대한 시작 단계의 연구에 해당한다. 따라서 경제성 및 정확성 면에서 모형을 선정할 때 2-방정식 난류모형이 가장 타당할 것으로 보인다.

본 연구에서는 식생 구간이 흐름 방향으로 교차적으로 연속해서 존재하는 교행식생 수로에서의 흐름에 대한 3차원 수치모의를 수행하였다. 수치모의를 위해 Olsen(2004)이 개발한 $k-\epsilon$ 3차원 모형을 이용하였다. 먼저 수치모의의 검증을 위해 하상의 일부만 식재된 부분 식생 수로를 수치모의하고 기존의 실험 결과와 비교하였다. 또한 교행식생 수로에서의 자유수면 유속을 계산하여 기존 문헌에 제시된 실험 결과와 비교하였으며, 식생밀도에 따른 유속 분포도 및 수위 변화에 대해 고찰하였다.

2. 수치모형

2.1 지배방정식

레이놀즈수가 충분히 큰 흐름의 경우 Navier-Stokes 방정식을 시간 및 공간평균하여 유도된 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \langle \bar{u}_j \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \langle \bar{u}_i' \bar{u}_j' \rangle}{\partial x_j} - f_i + g_j \quad (2)$$

여기서 \bar{u}_i 는 i -방향으로의 평균유속, ρ 는 유체 밀도, \bar{p} 는 평균 압력, ν 는 동점성계수, f_i 는 식생에 의한 항력항, $-\bar{u}_i' \bar{u}_j'$ 는 레이놀즈응력, g_j 는 중력가속도이다. 식(2)에서 식생에 의한 항력항은 다음과 같다.

$$f_i = \frac{1}{2} C_D \alpha \langle \bar{u}_i \rangle \sqrt{\langle \bar{u} \rangle^2 + \langle \bar{v} \rangle^2 + \langle \bar{w} \rangle^2} \quad (3)$$

여기서 C_D 는 항력계수, α 는 식생밀도이다. 지배방정식인 식(1)와 식(2)에서 방정식의 폐합문제를 위해 난류점성개념(Eddy viscosity concept)을 이용하여 레이놀즈응력을 모형화하였다.

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4)$$

여기서 ν_t 는 난류점성이고, k 는 난류운동에너지, δ_{ij} 는 Kronecker delta이다. 식(4)에서 난류점성(ν_t)는 다음과 같은 Kolmogorov-Prandtl식으로로부터 구할 수 있다.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

여기서 $C_\mu(=0.09)$ 는 경험상수, ε 은 k 의 소산률이다.

2.2 난류모형

식(5)에서 난류점성 ν_t 를 구하기 위해서는 k 와 ε 의 수송방정식을 해석해야 한다. 각각의 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle \bar{u}_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k + C_{fk} f_{xj} \langle \bar{u}_j \rangle - \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle \bar{u}_j \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + P_\varepsilon + C_{f\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} f_{xj} \langle \bar{u}_j \rangle - \frac{\varepsilon^2}{k} C_{\varepsilon 2} \quad (7)$$

여기서 $\sigma_k(=1.0)$, $\sigma_\varepsilon(=1.3)$, $\sigma_{\varepsilon 1}(=1.44)$, $\sigma_{\varepsilon 2}(=1.92)$ 는 모형상수로서, Launder와 Spalding(1974)의 표준값을 이용하였으며, C_{fk} 와 $C_{f\varepsilon}$ 은 식생에 대한 항력가중계수이다. 또한 P_k 는 난류 생성항으로서 다음과 같다.

$$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} \quad (8)$$

식(6)과 식(7)의 항력가중계수의 값을 Lopez와 Garcia(2001)와 강형식과 최성욱(2006)의 연구 결과에 따라 $C_{fk} = C_{f\varepsilon} = 0$ 으로 하였다.

2.3 경계조건

수치모의에 필요한 경계조건은 입구와 출구, 측벽 및 바닥과 같은 벽 경계와 자유수면에서의 경계조건이 필요하다. 먼저, 입구 경계에서는 전 단면에 걸쳐 균일한 유속이 발생하는 것으로 가정하였고, k 및 ε 과 같은 난류량에 대해서는 거의 영에 가까운 작은 값을 부여하였다. 출구 경계에서는 모든 변수에 대해 흐름방향으로의 경사를 영으로 하는 대칭평면 조건을 이용하였다. 또한 벽면에서는 유속의 경우 2층 벽법칙(law of the wall)을 이용하고, 난류량에 대해서는 벽함수(wall function)를 이용하였다.

구성된 흐름 지배 방정식은 유한체적법을 이용하여 모의되었다. 특히, 지배방정식에서 이송-확산항에 대해서는 Power-law 기법(Patankar, 1980)을 이용하여 이산화 되었으며, 압력항을 위해 SIMPLE 기법(Patankar, 1980)을 사용되었다. 또한, 자유수면의 위치 변화를 계산하기 위해 하류단의 수위 경계점을 고정하여 이 점에서는 수위가 변화하지 않는다는 조건하에 압력의 차이값을 이용하여 다음과 같이 수위 차를 계산하였다.

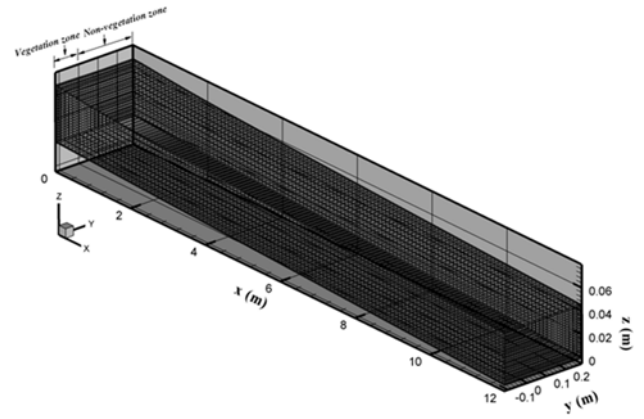


그림 1. 부분 식생 수로의 격자 구성도

$$\Delta h_{ij} = \frac{l}{\rho g} (P_{ij} - P_{ref}) \quad (9)$$

여기서 P_{ij} 는 (i, j) 위치에서의 계산된 압력값이고, P_{ref} 는 하류단에서의 대표 압력값이다. 식(8)은 Melaen(1992), Olsen과 Kjellsvig(1998) 등에 의해 사용되었으며, 개수로 흐름에서 수면 변화를 비교적 정확히 모의하는 것으로 나타났다.

3. 부분식생 수로

그림 1은 부분식생 수로에 대한 격자 구성도이다. 부분식생 수로는 하류의 일부분이 식생된 수로를 의미한다. 수치모의 결과의 비교를 위해 Tsujimoto와 Kitamura(1995)의 실내 실험 결과를 이용하였다. Tsujimoto와 Kitamura(1995)의 실험에 사용된 수로는 길이 12 m, 폭 0.4 m, 바닥 경사 0.0017이고, 식생이 식재된 수로 폭은 0.12 m로서 그림 1에서 $-0.12 \text{ m} < y < 0 \text{ m}$ 의 구간에서 식생이 식재되었다. 사용된 식생 재료는 대나무(bamboo)로서 원형 실린더 형태이고, 식생의 직경은 0.0015 m, 식생 간격은 실험 A1은 0.028 m, 실험 B1은 0.02 m이다. 한편, 등류 수심 조건으로는 실험 A1은 0.0457 m, 실험 B1은 0.0428 m이다. 수치모의에 사용된 격자 수는 $x \times y \times z = 121 \times 41 \times 21$ 이다.

그림 2는 수심적분된 주흐름방향 유속 분포도이다. 그림 2를 살펴보면, 수치모의 결과와 실험 결과가 매우 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 수심적분된 유속 분포도를 살펴보면, 식생 영역에서는 횡방향으로 거의 균일한 유속 분포를 갖는 것을 볼 수 있으며, 식생과 비식생의 경계부에서 유속이 급격히 증가되었다가 최대를 이루고 다시 우측 측벽 근처에서 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히, 식생과 비식생의 경계부에서 큰 유속 차에 의한 강한 전단층이 형성되어 유속 경사가 크게 발생되는데, 수치모의가 이와 같은 현상을 잘 예측하는 것으로 나타났다. 일반적으로 부분식생 수로 및 복단면 수로와 같이 수로 내에 강한 전단층이 존재하는 경우 수평면渦가 형성되고, 이는 두 흐름 영역 사이에 운동량 및 스칼라 교환에 큰 영향을 미치게 된다. 그러나 수평면渦는 순간 유속장(instantaneous velocity)에서 발생하는 것이기 때문에 본 연구와 같이 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용하는 모형에서는 형성되지 않는다.

그림 3은 수심적분된 레이놀즈응력($-\overline{u'v'}$) 분포도이다. 그

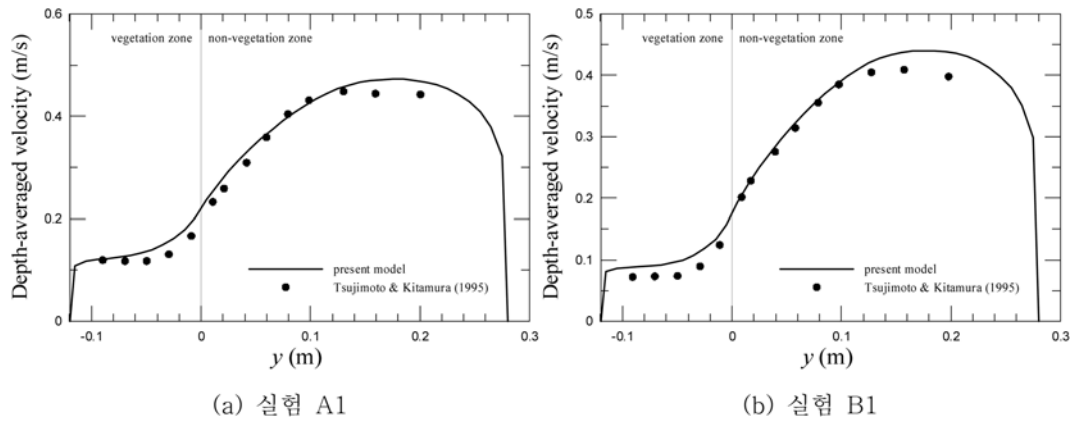


그림 2. 수심적분 유속 분포

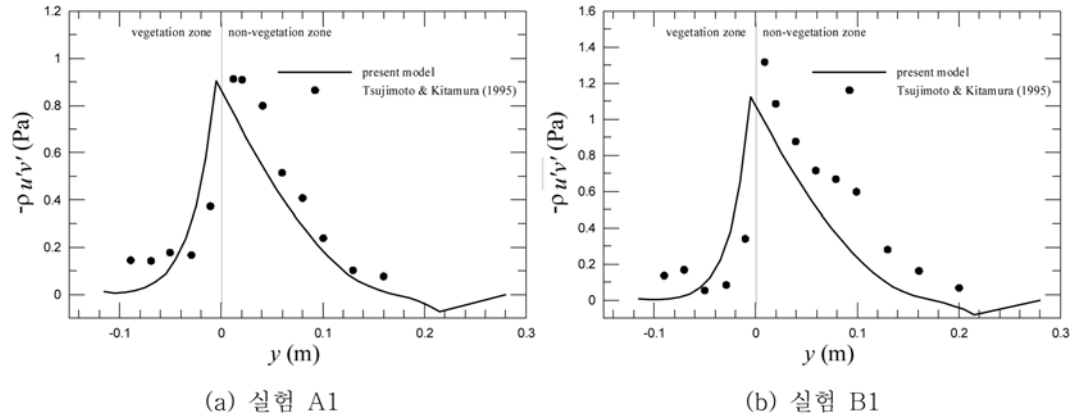


그림 3. 수심적분된 레이놀즈응력 분포

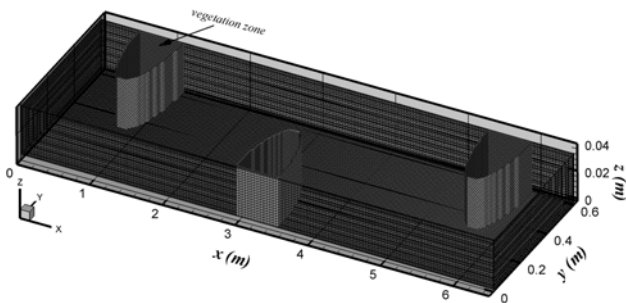


그림 4. 교행식생 수로에 대한 격자 구성도

림 3을 살펴보면, 수치모의 결과와 실험 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 특히, 레이놀즈응력의 최대값은 식생과 비식생 영역의 경계면에서 발생하는 것을 볼 수 있으며, 이는 본 연구에서 사용된 난류점성개념이 타당하다는 것을 의미한다. 즉, 난류점성개념으로부터 레이놀즈응력 $-\overline{u'v'}$ 는 횡방향으로의 속도경사 $\partial\overline{u}/\partial y$ 와 비례하기 때문이다. 또한 레이놀즈응력이 큰 영역은 그 만큼 횡방향으로의 운동량 교환 효과가 크다는 것을 의미한다. 따라서 전술한 바와 같이 식생과 비식생 영역의 경계부에서 운동량 효과가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 수치모의 결과와 실험 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 수치모의 결과가 비식생 영역에서는 다소 과소 산정되고, 식생 영역에서는 경계면 근처에서는 과대 산정하다가 측벽으로 갈수록 다시 과소 산정하는 것으로 나타났다. 또한 최대 레이놀즈응력의 발생 지점 역시 약간의 차이가 있는데, 수치모의

결과에서는 최대 레이놀즈응력이 식생 영역에서 발생되지만, 실험 결과에서는 비식생 영역에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 본 모형이 등방성 모형이기 때문인 것으로 보인다. 과거 강형식과 최성욱(2005)은 레이놀즈응력 모형을 이용하여 식생 수로에 대한 수직 1차원 흐름 구조를 예측한 결과 식생 높이 부근에서 난류의 비등방성(anisotropy)이 강하게 발생하는 것을 보였으며, 마찬가지로 Choi와 Kang(2006) 역시 레이놀즈응력모형을 이용하여 부분 식재된 수로를 등류상태의 3차원 수치모의를 수행한 결과 레이놀즈응력의 최대값이 실험 결과와 동일하게 비식생 영역에서 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 본 모형이 전반적인 평균유속 및 난류량 분포를 잘 예측할 수는 있지만, 경계면 부근에서 발생하는 난류의 비등방 효과를 예측할 수 없기 때문에 횡방향으로의 운동량 전달 효과를 정확히 모의할 수 없는 것으로 판단된다.

4. 교행식생 수로

그림 4는 교행식생 수로에 대한 격자 구성도이다. 그림에서 지름(D) 0.6 m인 반원으로 표시된 경계 내부가 식생으로 식재된 영역이다. 식생 영역은 $0.55\text{ m} < x < 1.15\text{ m}$, $2.95\text{ m} < x < 3.55\text{ m}$, $5.35\text{ m} < x < 5.95\text{ m}$ 구간이다. 수치모의 결과를 비교를 위해 표 1과 같은 Bennett 등(2002)의 실험 결과를 이용하였다. 실험에 사용된 식생 직경(d_v)은 모두 3.2 mm로 동일하고, 각 식생 영역별 식생 개수는 7, 113, 1753개로서 이에 대한 식생 밀도 a 는 각각 0.04%, 0.64%, 2.50%

표 1. 교행식생 수로의 실험 조건 (Bennett 등, 2002)

식생영역별 식생수	식생직경 (mm)	식생밀도 a (%)	유량 Q (m^3/s)	수심 H (m)	수로폭 B (m)	바닥경사
7	3.2	0.04	0.0042	0.023	0.6	0.0004
113	3.2	0.64	0.0042	0.026	0.6	0.0004
1753	3.2	9.97	0.0042	0.036	0.6	0.0004

9.97%이다. 여기서 식생 밀도의 정의는 $a = \text{식생 갯수} \times d_v^2 / (0.5D^2) \times 100(\%)$ 으로서 식생 구간 면적에 대한 식생이 차지하는 면적의 비로 정의하였다. 또한 유량은 $0.0042 m^3/s$ 이고, 각 식생 밀도별 수심은 $0.023 m$, $0.026 m$, $0.032 m$, $0.036 m$ 이며, 바닥 경사는 0.0004 로 동일하다. 한편, 입자영상유속계 (PIV, Particle Image Velocimetry) 를 이용하여 자유수면에서

의 유속을 측정하였으며, 수치모의에 사용된 격자 수는 $x \times y \times z = 382 \times 62 \times 23$ 이다.

그림 5와 그림 6은 각각 식생밀도 a 가 0.64% 와 9.97% 인 경우 거리에 따른 자유수면에서의 유속 분포도이다. 각각의 그림을 살펴보면, 계산결과와 수치모의의 결과가 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5에서의 유속 분포를 보면, 첫 번째 식생 영역 ($0.55 m < x < 1.15 m$) 을 지나면서 $0 m < y < 0.3 m$ 구간에서의 유속이 $0.3 m < y < 0.6 m$ 에서 보다 더 커지게 되고, 두 번째 식생 영역인 $2.95 m < x < 3.55 m$ 를 지나면 $0.3 m < y < 0.6 m$ 에서의 유속이 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 식생의 영향으로 인해 식생 반대편으로 유량이 집중되기 때문이다. 한편 식생밀도가 9.97% 인 그림 6을 살펴보면, 식생 밀도가 증가됨에 따라 식생 영역에서 유량이

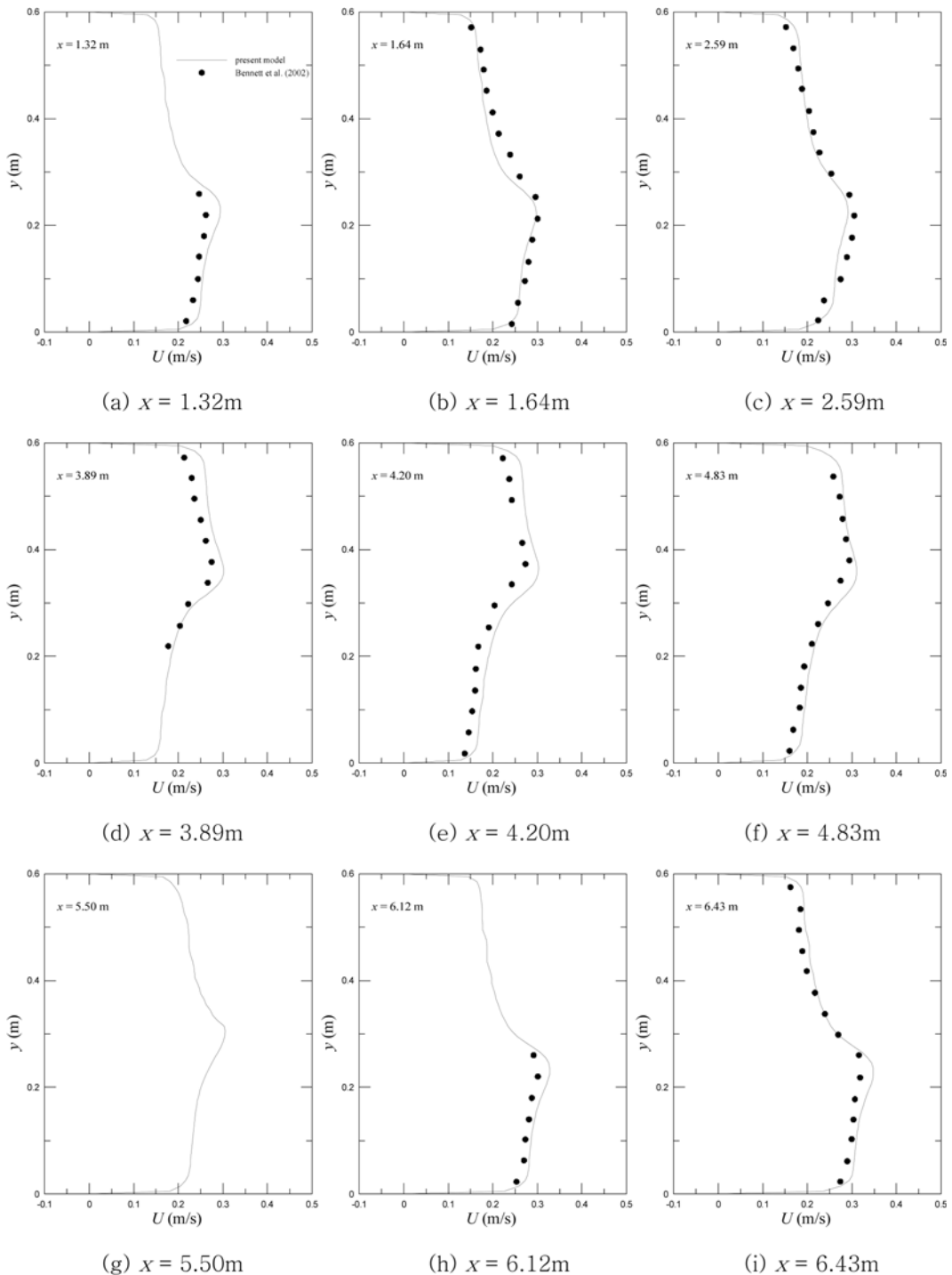


그림 5. 거리에 따른 자유수면 유속 변화 ($a = 0.64\%$)

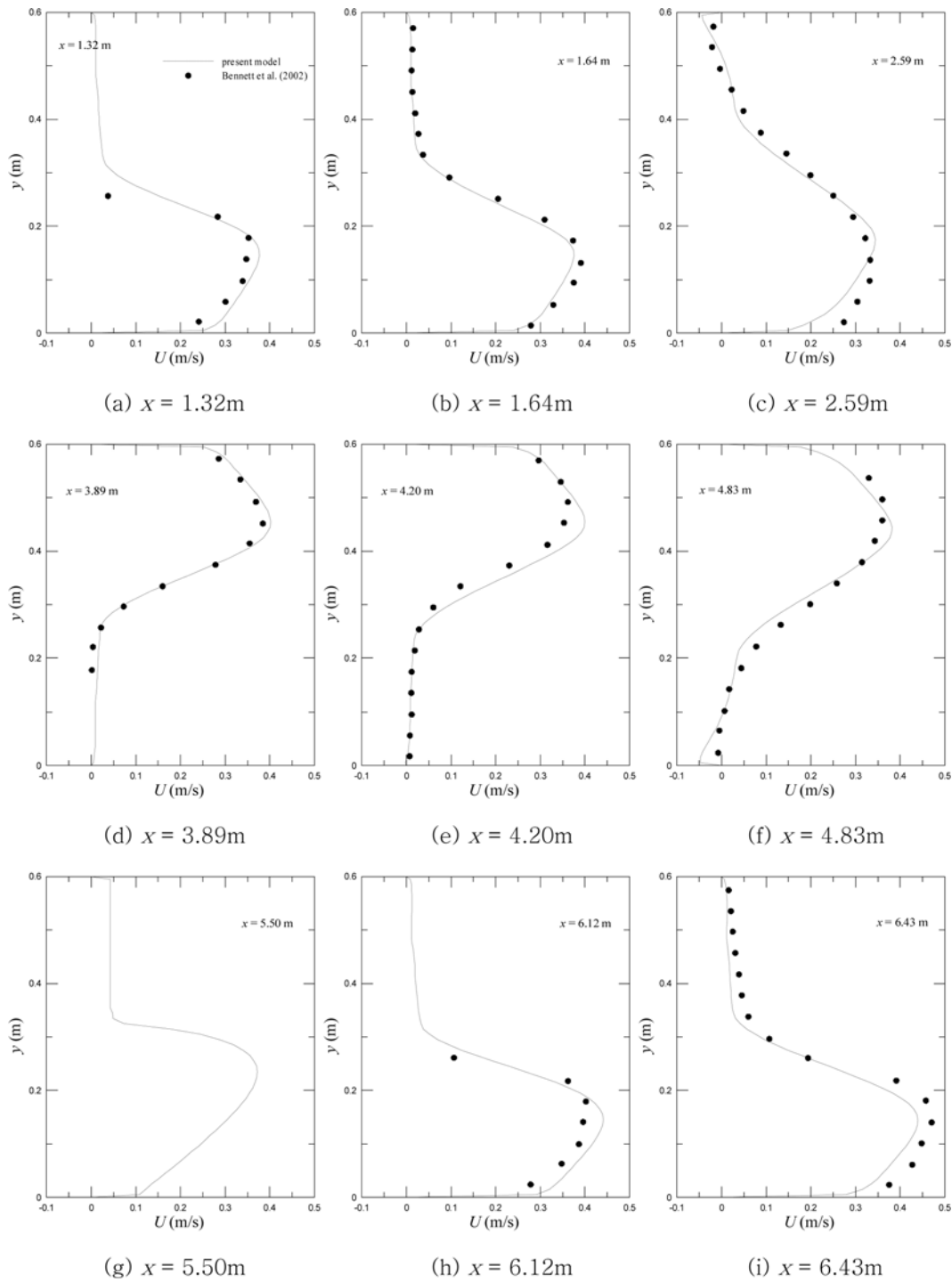


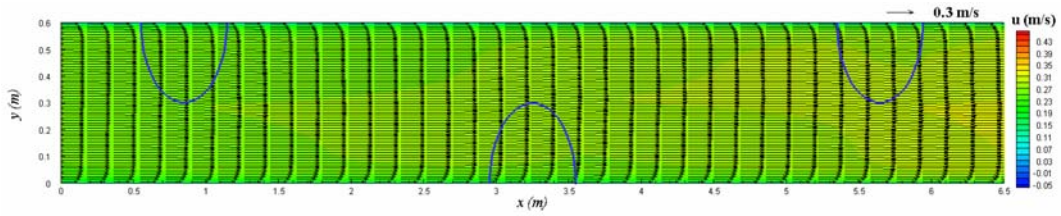
그림 6. 거리에 따른 자유수면 유속 변화 ($a = 9.97\%$)

배제되는 효과가 더 커지게되고, 이로 인해 유속 차이가 더욱 증가되는 것을 볼 수 있다. 한편, 그림 6(c)와 6(f)를 살펴보면, 음의 유속이 발생하는 구간이 존재하는데, 이는 식생에 의해 흐름이 반대편 측벽 쪽으로 집중됨에 따라 발생하는 재순환 흐름(recirculation flow) 때문인 것으로 보이며, 이에 대한 좀 더 자세한 설명은 다음 그림에 소개하였다.

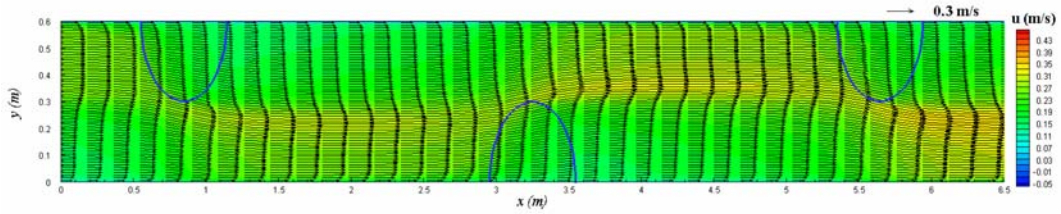
그림 7은 식생밀도에 따른 자유수면에서의 유속 벡터도 변화를 보여준다. 그림 7을 살펴보면, 식생밀도가 증가됨에 따라 식생 영역 내부 및 식생 영역의 하류 구간에서 유속이 감소되며, 식생 영역의 반대 구간에서는 유속이 증가 되는 것을 볼 수 있다. 따라서 식생밀도가 증가함에 따라 식생이 흐름 방향을 변화시켜 점차 만곡수로와 유사한 흐름 형태를

취하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 식생밀도가 9.97%인 경우, 식생영역의 하류 구간에 거의 영에 가까운 유속이 형성되는 구간이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 이동상 모의를 수행할 경우, 이 구간에 유사 퇴적이 발생되고, 갈수기일 때는 식생이 활착되어 식생 구간이 더 증가될 것이고, 반면 흐름이 집중되는 구간에서는 하상 침식이 발생되어 점차 만곡하천과 유사한 형태를 보일 것으로 예상된다.

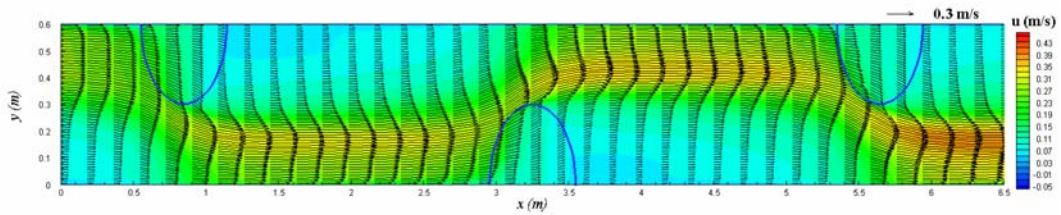
그림 8은 식생밀도 9.97%인 수로에서 바닥 근처 및 자유수면에서의 유속 벡터도를 비교한 것이다. 그림 8은 $4\text{ m} < x < 6\text{ m}$ 범위에서의 유속 벡터도이며, 그림에서 바닥 근처 유속은 바닥에서부터 수심 5%에 해당하는 위치에서의 유속을 나타낸다. 그림 8(a)의 자유수면에서의 유속 벡터도를 살펴



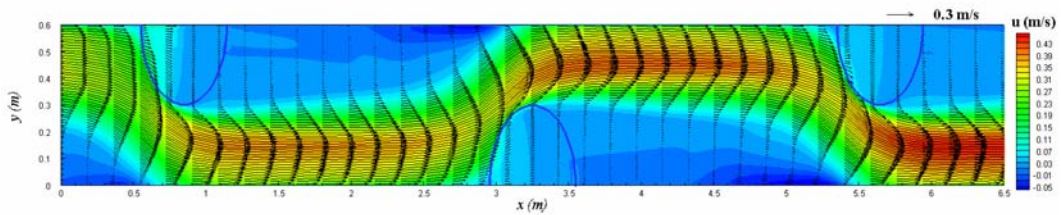
(a) $a = 0.04\%$



(b) $a = 0.64\%$



(c) $a = 2.50\%$



(d) $a = 9.97\%$

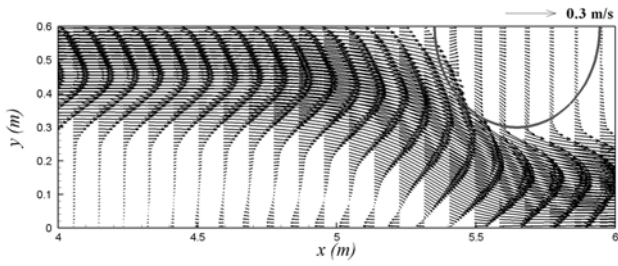
그림 7. 식생 밀도에 따른 자유수면 유속 분포 변화도

보면, 식생에 의해 흐름 방향이 반대 측벽쪽으로 급격히 전환됨에 따라 반대 측벽에서는 재순환 흐름이 형성되는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 8(b)의 바다 근처에서의 유속 벡터도를 보면, 자유수면과 마찬가지로 식생 영역의 반대 측벽에서 재순환 흐름이 형성되며, 식생 영역의 앞에서도 흐름이 고 밀도의 식생 영역과 충돌함에 따라 역방향으로의 흐름이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 바다 근처에서는 바다에서의 마찰저항에 의해 자유수면 보다 상대적으로 작은 운동량이 발생되기 때문인 것으로 보인다. 이와 같은 이유로 인해 전반적인 유속 벡터도 역시 바다와 수면에서 약간 다르게 형성되는 것을 볼 수 있으며, 특히 최대 유속의 발생 지점이 자유수면에 비해 식생 영역과 좀 더 떨어진 것을 확인할 수 있다. 그림 9는 식생밀도 9.97%인 수로에서의 흐름 추적선 분포를 보여준다. 그림 9를 보면, 전술한 바와 같이 각 식생 영역의 반대 측벽 근처에서 흐름의 집중 현상으로 인해 수직방향渦가 형성되는 것을 볼 수 있다.

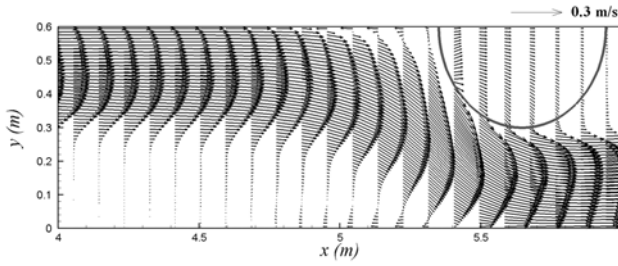
그림 10은 식생밀도에 따른 자유수면에서의 최대유속 발생 지점을 비교한 것이다. 그림 10을 살펴보면, 앞의 그림 7의 유속 벡터도와 같이 식생밀도 a 가 0.04%에서 9.97%로

증가함에 따라 최대 유속의 발생지점이 수로 중심($y=0.3$ m)에서 점차 멀어지는 것을 볼 수 있다. 특히, 식생밀도가 0.64%와 9.97%인 경우 최대 유속의 발생 지점은 수로 중심에서부터 최대 약 0.07 m와 0.15 m 떨어진 위치에 있는 것으로 나타났다.

그림 11은 식생밀도 a 가 9.97%인 수로에서 $x-z$ 평면에 대한 유속 분포도이다. 그림 11에서의 횡방향 위치는 $y=0.07$ m이다. 그림 11(a)는 식생 영역을 포함하는 2.7 m < x < 3.7 m 범위에서의 $u-w$ 유속 벡터도와 주흐름방향 유속 분포도이다. 그림 11(a)를 보면, 식생에 의해 수위가 약 0.006 m 상승되는 것으로 나타났다. 또한 유속 벡터도를 보면 식생 영역 앞에서 하향류가 발생하며, 하향류의 크기는 다른 불투수성 구조물 앞에서 발생하는 것에 비해 작게 형성되는 것을 볼 수 있다. 또한 주흐름방향 유속을 살펴보면, 식생 영역 앞에서 유속이 급격히 감소되며, 식생 영역 내부에서는 거리에 따라 점차 감소되는 것을 확인할 수 있다. 그림 11(b)는 4.0 m < x < 5.4 m 구간에서의 유속 벡터도이다. 이 구간은 앞의 그림 7(d)와 같이 재순환 흐름이 형성되는 구간이다. 그림 11(b)를 살펴보면, x = 약 5.18 m에서 흐름



(a) 자유수면 유속



(b) 바닥 근처 유속

그림 8. 바닥 근처 및 자유 수면에서의 유속 분포도 ($a=9.97\%$)

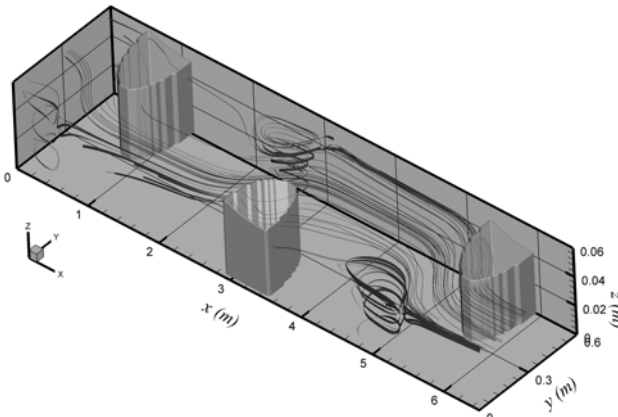


그림 9. 흐름 추적선 분포($a=9.97\%$)

분리가 형성되어 이 지점에서 상류 방향으로 흐름이 진행되는 것을 볼 수 있다. 한편, 그림에서 점선으로 표시된 부분은 재순환에 의한 역방향 흐름과 순방향 흐름의 경계부를 나타내는데, 점선 표시 영역 부근에서 반시계 방향으로 회전하는 횡방향渦가 형성되는 것을 볼 수 있다. 또한 바닥 및 수면 근처에서 역방향 흐름의 발생 영역을 비교해 보면 수면 근처에서 더 큰 것을 볼 수 있다.

그림 12와 13은 주흐름방향 거리인 $x=2.5$ m와 3.25 m 위치의 횡단면에서의 식생 밀도에 따른 주흐름방향 유속 분

포도 변화를 보여준다. $x=2.5$ m는 첫 번째와 두 번째 식생 영역의 중간 부근에 해당하고, $x=3.25$ m는 두 번째 식생의 중앙 지점을 나타낸다. 먼저 그림 12를 살펴보면, 식생밀도가 0.04% 인 경우, 식생의 영향이 크지 않기 때문에 계산된 등유속선은 식생이 없는 일반 개수로와 크게 다르지 않은 것을 볼 수 있다. 그러나 식생밀도가 점차 증가함에 따라 그림 12에서 오른쪽 측벽 부근의 영역에서 흐름이 배제되어 좌측으로 이동함에 따라 좌측 영역에서 흐름이 집중되고 유속이 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 최대 유속의 발생 위치 역시 식생 밀도의 증가에 따라 점차 좌측 벽 방향으로 이동되는 것을 확인할 수 있다. 두 번째 식생의 중앙 지점에서의 유속 분포를 비교한 그림 13을 살펴보면, 식생밀도가 0.04% 인 경우에는 앞의 그림 12(a)와 유사한 분포를 보이고, 식생밀도가 증가함에 따라 식생 영역인 $0\text{ m} < y < 0.3\text{ m}$ 에서 흐름이 점차 감소되고 균일해 지는 것을 볼 수 있다. 또한 앞의 그림 12와 마찬가지로 식생밀도의 증가에 따라 최대 유속의 발생 지점이 점차 오른쪽 측벽 방향으로 이동되는 것을 볼 수 있다. 한편, 그림 12와 13을 보면, 식생 밀도에 따라 수위가 상승하여 식생밀도가 0.04% 인 수위에 비해 9.97% 인 경우 약 0.016 m 상승하는 것으로 나타났다.

그림 14는 두 번째 식생 구간이 시작되는 $x=2.95$ m와 식생 영역의 중간점인 $x=3.25$ m 지점에서의 식생밀도에 따른 편수위 변화를 비교한 것이다. 그림 14에서의 세로축은 계산된 횡방향 수위와 수로 중앙 위치인 $y=0.5\text{ B}$ 에서의 수위 차를 나타낸다. 먼저 그림 14(a)를 살펴보면, 식생으로 인해 $0\text{ m} < y < 0.3\text{ m}$ 인 구간에서 흐름이 식생 영역과 충돌함에 따라 식생밀도에 따라 수위가 상승되고, 반대편 영역에서는 수위가 감소되는 것을 볼 수 있다. 수위 감소는 식생밀도 $a=2.5\%$ 이후 거의 일정한 것으로 나타났다. 또한 식생밀도가 9.97% 인 경우를 살펴보면, 최대 약 0.0024 m 의 편수위가 형성되고, 약 $y=0.13\text{ m}$ 지점에서 최대 수위가 형성되는 것으로 나타났다.

그림 14(b)는 $y=3.25$ m에서의 수위 변화를 보여준다. 그림 14(b)를 살펴보면, 식생 영역과 비 식생 영역 모두 수위가 상승되는 것을 확인할 수 있다. 식생 영역에서의 수위 상승은 식생에 의한 항력의 직접적인 영향으로 인해 유속이 감소되어 수위가 상승되는 것으로 보이며, 비식생 영역에서의 수위 상승은 식생영역에서 배제된 유량을 포함함에 따른 흐름 집중 효과로 인해 상승되는 것으로 판단된다. 또한 수

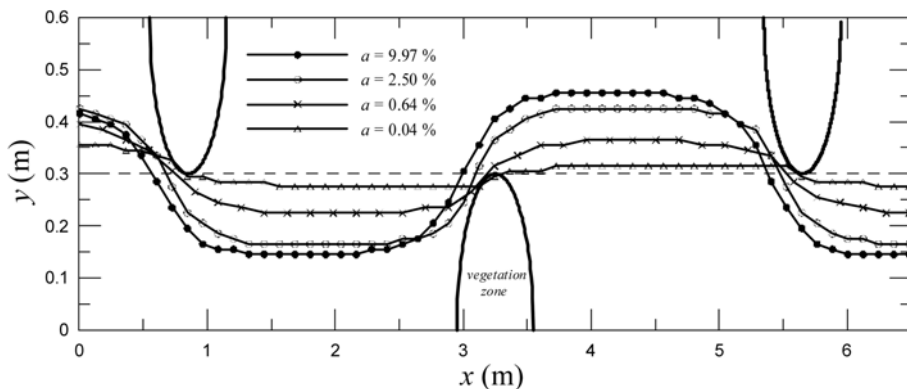
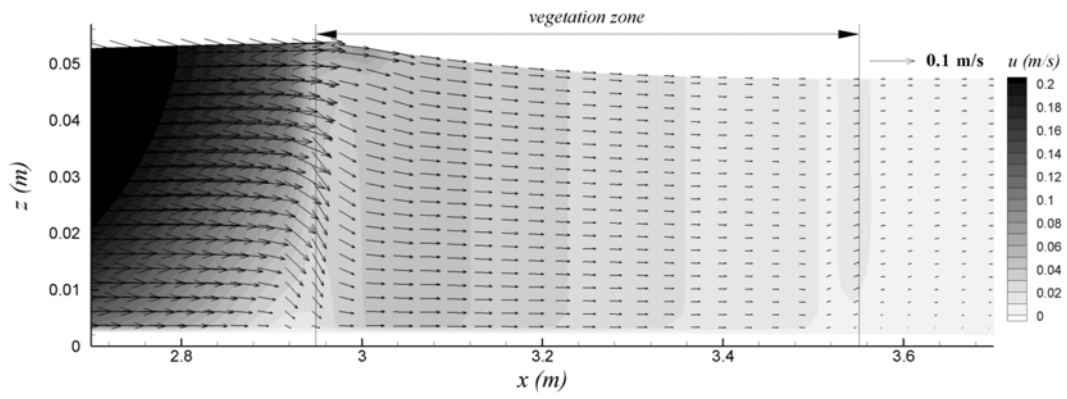
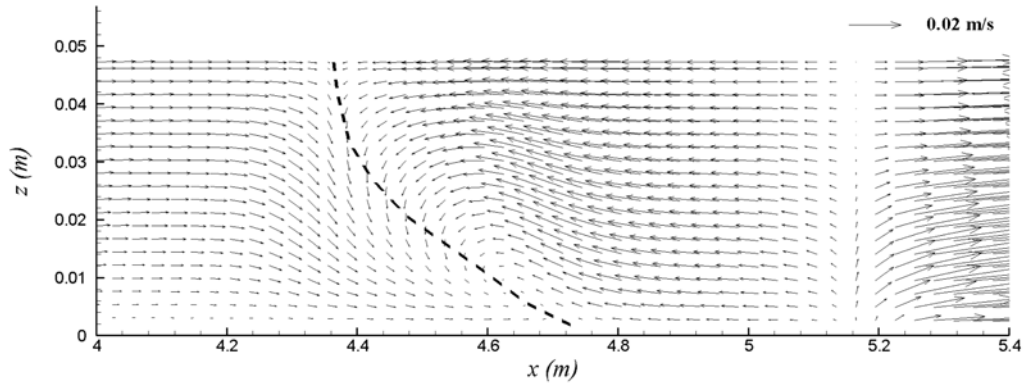


그림 10. 식생밀도에 따른 자유수면에서의 최대유속 발생 위치 분포

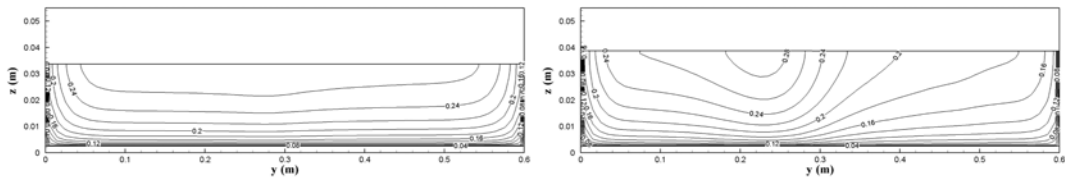


(a) $2.7\text{m} < x < 3.7\text{m}$



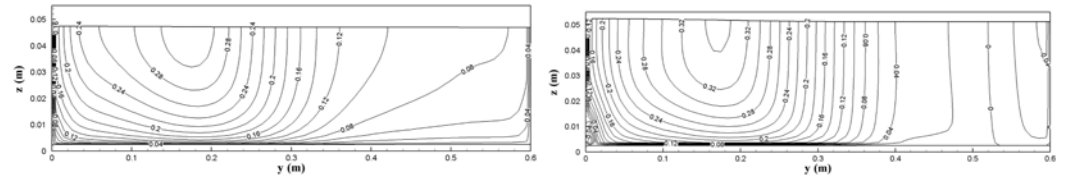
(b) $4.0\text{m} < x < 5.4\text{m}$

그림 11. $a=9.97\%$ 인 경우 x - z 평면에서의 유속 분포도 (at $y=0.07\text{m}$)



(a) $a = 0.04\%$

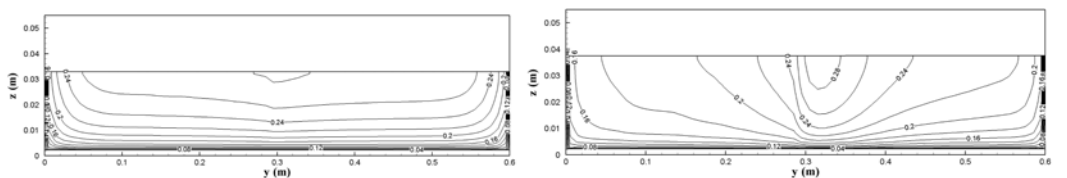
(b) $a = 0.64\%$



(c) $a = 2.50\%$

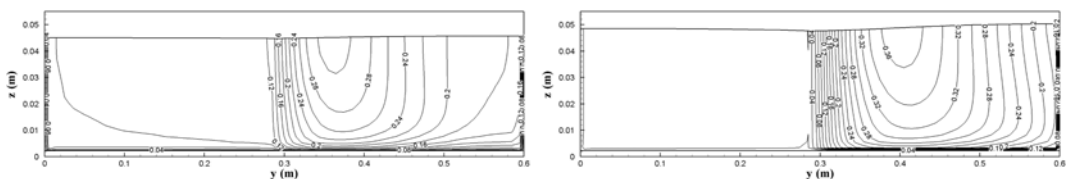
(d) $a = 9.97\%$

그림 12. 식생 밀도별 거리에 따른 주흐름방향 유속 분포도 변화(at $x=2.5\text{m}$)



(a) $a = 0.04\%$

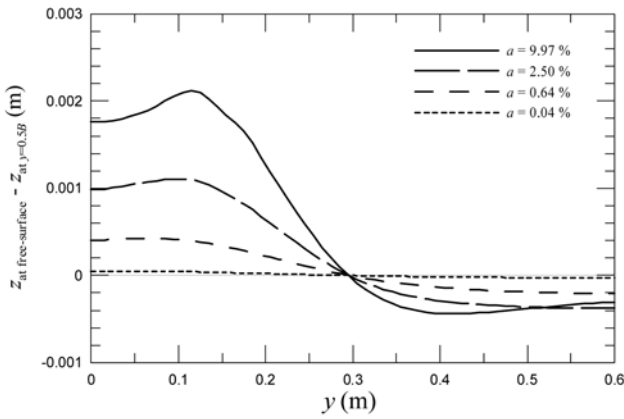
(b) $a = 0.64\%$



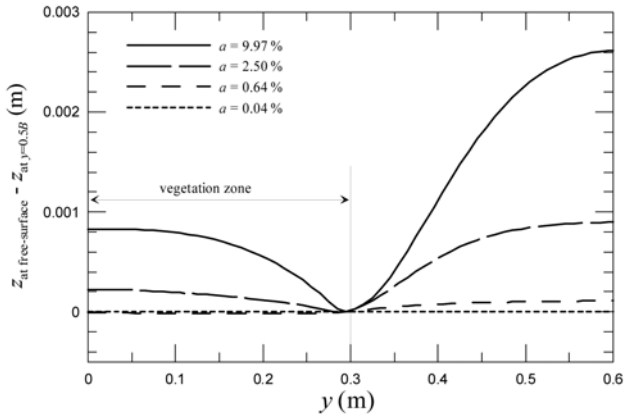
(c) $a = 2.50\%$

(d) $a = 9.97\%$

그림 13. 식생 밀도별 거리에 따른 주흐름방향 유속 분포도 변화(at $x=3.25\text{m}$)



(a) $y = 2.95$ m



(b) $y = 3.25$ m

그림 14. 식생 밀도에 따른 횡방향 수위 변화 비교

위 상승 효과는 식생 영역 보다 비식생 영역에서 더 크게 발생하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 주흐름방향으로 식생 군집이 연속해서 교차적으로 존재하는 교행 식생 수로에서의 3차원 수치모의를 통하여 식생이 유속 및 수위에 미치는 영향을 분석하였다.

1. 수치모형의 검증을 위해 부분식생 수로에서의 평균유속과 레이놀즈응력을 계산한 결과, 기존의 실험결과와 잘 일치하였다. 그러나 $k-\epsilon$ 모형이 등방성 모형이기 때문에 식생과 비식생 영역 사이의 운동량 교환 효과를 정확히 반영할 수 없는 것으로 확인되었다.
2. 다양한 식생밀도에 대하여 교행식생 수로를 수치모의하고 거리에 따른 자유수면에서의 유속 분포를 계산한 결과 실험결과와 매우 잘 일치하였다. 또한 식생이 흐름 방향을 변화시켜 식생 밀도가 증가함에 따라 점차 만곡수로 형태의 흐름이 형성되는 것을 확인하였으며, 식생밀도가 9.97%인 경우 식생 영역의 반대 측벽 부근에서 재순환 흐름이 발생하는 것으로 나타났다.
3. 식생 밀도에 따라 횡단면에서의 유속 분포를 계산한 결과, 식생밀도에 따라 점차 최대 유속의 발생 위치가 식생영역의 반대편 측벽 쪽으로 이동되는 것으로 나타났다. 또한 자유수면 변화를 모의한 결과, 식생 전면부에서는 배수 효과로 인해 수위가 상승되고, 식생 영역의 반대편 구간에서는 식생에 의한 흐름 집중 효과로 인해 수위가 상승되는

것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업(06건설핵심 B01)의 '자연과 함께하는 하천복원기술 개발(Ecoriver 21)'의 연구 지원에 의해 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 강형식, 최성욱(2005) 식생된 개수로 흐름에서의 난류의 비등방성, *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제38권 제10호, pp. 871-883.
- 강형식, 최성욱(2006) 식생된 개수로에서 항력가중계수가 흐름에 미치는 영향 분석, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제26권 제5B호, pp. 529-537.
- 강형식, 최성욱(2007) 전단면 식생된 개수로 흐름에서 주흐름방향渦 구조의 수치모의, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제27권 제3B호, pp. 289-299.
- 김태범, 최성욱, 전웅현(2007) 식생항력을 고려한 2차원 수심적분 유한요소모형 개발, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, 대한토목학회, pp. 1337-1340.
- 최성욱, 강형식(2007) 수심적분 모형을 이용한 침수식생 수로의 흐름 및 유사이동 모의, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제27권 제6B호, pp. 621-629.
- Ackerman, J.D. and Okubo, A. (1993) Reduced mixing in a marine macrophyte canopy, *Functional Ecology*, Vol. 7, pp. 305-309.
- Bennett, S.J., Prim, T., and Barkdoll, B.D. (2002) Using simulated emergent vegetation to alter stream flow direction within a straight experimental channel, *Geomorphology*, Vol. 44, pp. 115-126.
- Choi, S.-U. and Kang, H. (2004) Reynolds stress modeling of vegetated open-channel flows, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 42, No. 1, pp. 3-11.
- Choi, S.-U. and Kang, H. (2006) Numerical investigations of mean flow and turbulence structures of partly vegetated open channel flows using the Reynolds stress model, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 44, No. 2, pp. 203-217.
- Cui, J. and Neary, V. (2008) LES study of turbulent flows with submerged vegetation, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 46, No. 3, pp. 307-316.
- 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.
- Fischer-Antze, T., Stoesser, T., Bates, P., and Olsen, N.R.B. (2001) 3D numerical modeling of open-channel flow with submerged vegetation, *Journal of Hydraulic Engineering*, IAHR, Vol. 39, No. 3, pp. 303-310.
- Ghisalberti, M. and Nepf, H.M. (2002) Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows, *Journal of Geophysical Research*, AGU, Vol. 107(C2), pp. 3-1-3-11.
- Ghisalberti, M. and Nepf, H.M. (2005) Mass transport in vegetated shear flows, *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 5, pp. 527-551.
- Ikeda, S. and Kanazawa, M. (1996) Three dimensional organized vortices above flexible water plants, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 11, pp. 634-640.
- Kanda, M. and Hino, M. (1994) Organized structures in developing turbulent flow within and above a plant canopy using a large eddy simulation, *Boundary Layer Meteorology*, Vol. 68, pp. 237-257.

- Kang, H. and Choi, S.-U. (2006) Turbulence modeling of compound open-channel flows with and without vegetation on the floodplain using the Reynolds stress model, *Advances in Water Resources*, Vol. 29, No. 11, pp. 1650-1664.
- Kang, H. and Choi, S.-U. (2008) Turbulence modeling of solute transport in open channel flows over submerged vegetation, *IAHR-APD*, Beijing, China.
- Lauder, B.E. and Spalding, D.B. (1974) The numerical computation of turbulent flow, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 3, pp. 269-289.
- Lopez, F. and Garcia, M. (2001) Mean flow and turbulence structure of open-channel flow through non-emergent vegetation, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 5, pp. 392-402.
- Melaen, M.C. (1992) Calculation of fluid flows with staggered and nonstaggered curvilinear nonorthogonal grids- the theory, *Numerical Heat Transfer*, Part B, Vol. 21, pp. 1-19.
- Naot, D. and Rodi, W. (1982) Calculation of secondary currents in channel flows, *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 108(HY8), pp. 948-968.
- Naot, D., Nezu, I., and Nakagawa, H. (1996) Hydrodynamic behavior of partly vegetated open-channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 11, pp. 625-633.
- Nezu, I. and Onitsuka, K. (2001) Turbulent structures in partly vegetated open-channel flows with LDA and PIV measurements, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 39, No. 6, pp. 629-642.
- Olsen, N.R.B. (2004) A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intake with multi-block option, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology.
- Olsen, N.R.B. and Kjellesvig, H.M. (1998) Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 36, No. 4, pp. 579-590.
- Patankar, S.V. (1980) *Numerical heat transfer and fluid flow*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Shimizu, Y. and Tsujimoto, T. (1993) Comparison of flood flow structure between compound channel and channel with vegetation zone, *Proceedings of 25th IAHR Congress*, Delft, The Netherlands.
- Shimizu, Y. and Tsujimoto, T. (1994) Numerical analysis of turbulent open-channel flow over a vegetation layer using a k-ε turbulence model, *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol. 11, No. 2, pp. 57-67.
- Stone, B.M. and Shen, H.T. (2002) Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 5, pp. 500-506.
- Tsujimoto, T. (1999) Fluvial processes in streams with vegetation, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 37, No. 6, pp. 789-803.
- Tsujimoto, T. and Kitamura, T. (1995) Lateral bed load transport and sand-ridge formation near vegetation zone in an open channel, *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol. 13, pp. 35-45.
- Tsujimoto, T. and Kitamura, T. (1996) Deposition of suspended sediment near vegetated area during flood and growth of vegetated area in dry season, *Proceedings of International Conference on New/Emerging Concepts for Rivers, Rivertech96*, Chicago, Illinois, USA.
- Wu, W. and Wang, S.Y. (2004) A depth averaged two-dimensional numerical model of flow and sediment transport in open channel with vegetation, in *Rapirarian Vegetation and Fluvial Geomorphology*, edited by Bennett, Water Science and Application 8, pp. 253-265.
- Xiaohui, S. and Li, C.W. (2002) Large eddy simulation of free surface turbulent flow in partly vegetated open-channels *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 39, pp. 919-937.

(접수일: 2009.1.5/심사일: 2009.2.24/심사완료일: 2009.4.10)