

비선형 k- ϵ 모형을 이용한 부분 식생 개수로 흐름의 평균흐름 및 난류구조 수치모의

최성욱* · 최성욱** · 김태준***

Choi, Seongwook*, Choi, Sung-Uk**, Kim, Taejoon***

Numerical Simulation of Mean Flows and Turbulent Structures of Partly-Vegetated Open-Channel Flows using the Nonlinear k- ϵ Model

ABSTRACT

This study presents a numerical modeling of mean flow and turbulence structures of partly-vegetated open-channel flows. For this, Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with vegetation drag terms are solved numerically using the non-linear k- ϵ model. The numerical model is applied to laboratory experiments of Nezu and Onitsuka (2001), and simulated results are compared with data from measurement and computations by Kang and Choi's (2006) Reynolds stress model. The simulation results indicate that the proposed numerical model simulates the mean flow well. Twin vortices are found to be generated at the interface between vegetated and non-vegetated zones, where turbulence intensity and Reynolds stress show their maximums. The model simulates the pattern of the Reynolds stress well but under-predicts the intensity of Reynolds stress slightly.

Key words : Partly-vegetated open-channel flow, Turbulence model, Mean flow, Turbulence structure, Non-linear k- ϵ model

초 록

본 연구에서는 부분 식생된 개수로에서 평균흐름 및 난류구조에 관한 수치모의 결과를 제시하였다. 이를 위하여 식생항력항이 포함된 레이놀즈 평균 Navier-Stokes 방정식을 수치해석 하였고 난류 모형으로 비선형 k- ϵ 모형을 이용하였다. 제시된 모형을 Nezu and Onitsuka (2001)의 실험수로에 적용하여 모의된 결과를 실험 계측자료 및 Kang and Choi (2006)의 Reynolds stress model 모의결과와 비교하였다. 실험결과와 비교한 결과에 따르면, 비선형 k- ϵ 모형이 평균흐름의 대체적인 경향을 잘 모의하는 것으로 확인되었다. 또한, 식생 영역과 비식생 영역의 경계면에서 쌍와 (twin vortices)가 생성되고 난류강도와 레이놀즈 응력의 최대점이 위치하는 것을 확인하였다. 레이놀즈 응력에 대해서는 경향은 잘 모의하지만 정량적으로 과소 산정하는 것으로 나타났다.

검색어 : 부분 식생 개수로 흐름, 난류모형, 평균흐름, 난류 구조, 비선형 k- ϵ 모형

1. 서론

하천의 흐름은 일반적으로 난류이며 복잡한 3차원 구조를 가진다. 특히 식생이 홍수로 인해 완전히 침수된 하천의 경우 식생의 윗면이 식생과 비식생 경계면의 면적으로 추가되는데, 이 경계면은 난류의 비등방성을 크게 발생시키기 때문에 하천은 더욱 복잡한

* 정희원 · 연세대학교 대학원 토목환경공학과 석·박사통합과정 (csu1220@hotmail.com)

** 정희원 · 교신저자 · 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author · Yonsei University · schoi@yonsei.ac.kr)

*** 연세대학교 대학원 토목환경공학과 석·박사통합과정 (crayon@yonsei.ac.kr)

Received December 23, 2013/ revised January 28, 2014/ accepted April 26, 2014

흐름양상을 보이게 된다. 따라서 부분 식생 하천의 복잡한 흐름을 파악하기 위해서는 3차원 난류모의가 필요하다.

난류를 모의하는 방법은 크게 DNS (Direct Numerical Simulation), LES (Large Eddy Simulation), 그리고 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)모형으로 나뉘어진다. DNS는 하천 흐름에 대하여 매우 작은 와(渦)까지 모의하여 매우 정확한 결과를 얻을 수 있으나 매우 작은 와(渦)를 모의하기 위하여 많은 계산량을 요구하게 되기 때문에 비경제적이다. 큰 와(渦)만을 모의하고 나머지는 모형화하는 LES의 경우도 많은 연구가 진행되어 DNS에 가까운 정확도를 가지게 되었으나, 실제 하천에 적용하기에는 아직 계산량을 많이 요구하는 문제가 있다. RANS 모형은 모든 흐름을 시간평균하고 모형화 하기 때문에 정확도가 모형상수에 따라 달라지지만 많은 계산량을 요구하지 않기 때문에 경제적이다. RANS 모형 중 많은 실험으로 모형상수들이 잘 제시된 것이 $k-\varepsilon$ 모형과 $k-\omega$ 모형으로 이들은 공학 분야에서 널리 사용되어왔다. 그러나 모형에서 사용하는 난류점성계수 추정법의 한계로 인하여 비등방성이 강한 흐름에 대하여 잘 모의하지 못하기 때문에 식생된 개수로의 흐름에 적용하기에 곤란한 문제가 있다.

식생된 개수로 흐름의 전산 유체 역학 모델링에 관한 상당한 양의 문헌 조사는 Stoesser et al. (2004) and Wilson et al. (2005)에서 찾아볼 수 있다. Shimizu and Tsujimoto (1993)는 대수 응력 모형(Algebraic Stress Model)을 사용하여 부분 식생 직사각형 개수로 흐름을 모의하였고, 비식생 복단면 개수로의 흐름 구조와의 차이점에 대해 분석하였다. Naot et al. (1996)은 대수 응력 모형을 사용하여 부분 식생된 개수로 흐름을 수치 모의하였으며, 실험 자료와 비교를 통해 그 모형의 적용성을 입증하고자 하였다. 하지만 유속 최대점 침강현상(velocity dip phenomenon)은 그들의 모의 결과에서 볼 수 없었고 이차류나 난류량과 같은 세부적인 흐름 구조 또한 제시되지 않았다. Fischer-Antze et al. (2001)은 표준 $k-\varepsilon$ 난류 모형을 이용하여 식생된 개수로 흐름을 수치 모의하였는데, 이 연구에서는 모의된 평균흐름만을 실험 데이터와 비교하였다. Xiaohui and Li (2002)는 부분 식생된 직사각형 개수로 흐름을 모의하기 위한 LES 모형을 제시하였다. 그들은 식생 영역과 비식생 영역의 경계에서 와(渦)의 크기가 커져서 하류로 이동하는 것을 발견하였다. Nezu and Onitsuka (2001)은 particle-image velocimetry (PIV) and laser Doppler anemometer (LDA)를 이용하여 다양한 형태의 부분 식생 개수로의 유속분포와 난류량분포를 측정하여 대략적인 경향을 분석하였다. Choi and Kang (2006)은 레이놀즈 응력 모형(Reynolds Stress Model, RSM)을 사용하여 식생 밀도에 따른 부분 식생 개수로 흐름을 수치 모의하였다.

국내에서 식생 개수로의 흐름에 대한 연구는 많이 진행되어왔으나 부분 식생 개수로의 강한 비등방성을 고려한 연구는 거의 없는

상황이다. 부분 식생 개수로를 해석하기 위해서 LES나 RSM과 같은 고급 수치모형을 사용하는 것도 가능한 하나 복잡한 형상을 가진 하천에 적용하기에는 너무 많은 계산량을 요구하게 되므로 부분식생 개수로의 복잡한 흐름특성이 고려되며 간단한 모형이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 RANS 모형 중 $k-\varepsilon$ 모형에서 난류의 비등방성을 보완한 비선형 $k-\varepsilon$ 모형을 이용하여 부분 식생 개수로의 평균흐름과 난류구조를 모의하고자한다. 이를 위해 Nezu and Onitsuka (2001)의 부분 식생 개수로 실험에 적용하여 실험 결과와 비교하고 Choi and Kang (2006)의 RSM 수치모의 결과와 비교하였다. 이를 통해 부분 식생 개수로의 평균흐름과 난류구조의 특성을 파악하고자 한다.

2. 지배 방정식

2.1 유동모형

식생항력을 고려한 RANS 방정식은 다음과 같이 연속방정식과 운동량 방정식으로 각각 구성된다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) - f_{vi} + g_i \tag{2}$$

Eqs. (1) and (2)에서 x_i ($i = 1, 2, 3$)는 각각 x, y, z 로 주 흐름 방향, 횡방향, 그리고 연직방향 거리를 의미한다. ρ 는 유체의 밀도, g_i 는 중력의 각 방향 성분이고, \bar{u}_i 는 각 방향의 시간 평균된 유속 ($\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$), \bar{p} 는 시간 평균된 압력, ν 는 유체의 동점성계수, $-\overline{u'_i u'_j}$ 는 레이놀즈 응력, 그리고 f_{vi} 는 각 방향의 식생항력으로 다음과 같다.

$$f_{vi} = \frac{1}{2} C_d a u_i \sqrt{\sum_{j=1}^3 \bar{u}_j^2} \tag{3}$$

여기서 C_d 는 식생항력 계수이며 a 는 식생밀도이다. 식생항력 C_d 는 Dunn (1996)에 의해 다음과 같이 제시되었다.

$$\frac{C_d}{C_{DA}} = 0.74 + 3.51 \left(\frac{x_3}{h_p} \right) - 6.41 \left(\frac{x_3}{h_p} \right)^2 + 2.72 \left(\frac{x_3}{h_p} \right)^3 \tag{4}$$

여기서 h_p 는 식생의 높이다. 연속방정식과 3개의 운동량방정식

을 이용하여 $\overline{u_i}, \overline{p}, \overline{u'_i u'_j}$ 를 모두 계산하는 것은 수학적으로 불가능하다. 이를 난류의 폐합문제라 하며 해결을 위해 난류모형을 사용할 필요가 있다.

2.2 표준 $k-\epsilon$ 모형

레이놀즈응력을 계산하기 위하여 레이놀즈응력의 수송방정식을 전부 계산하는 것도 가능하나 수송방정식의 수가 과다하게 많아서 비경제적이다. 그러므로 레이놀즈응력에 대하여 Boussinesq (1877)의 난류점성계수 추정법을 이용하면 레이놀즈응력의 비등방향을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$-\overline{u'_i u'_j} + \frac{2}{3} k \delta_{ij} = 2\nu_t S_{ij} \quad (5)$$

여기서 k 는 난류운동에너지, ν_t 는 난류점성계수로 Prandtl-Kolmogorov 관계식을 통해 다음과 같이 계산한다.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

여기서 C_μ 는 경험상수로 Launder and Spalding (1974)은 0.09을 제시하였고 ϵ 은 난류운동에너지의 소산율이다. Eq. (5)에서 S_{ij} 는 변형을 텐서로 다음과 같다.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

본 연구에서 사용하는 k 와 ϵ 은 각각의 수송방정식을 이용하여 계산한다. k 와 ϵ 의 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \epsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\epsilon}{k} (c_{\epsilon 1} P_k - c_{\epsilon 2} \epsilon) \quad (9)$$

여기서 $\sigma_k, \sigma_\epsilon, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ 은 경험상수로 Launder and Spalding (1974)은 각각 $\sigma_k = 1, \sigma_\epsilon = 1.3, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92$ 을 제시하였다. Eqs. (8) and (9)의 P_k 는 난류운동에너지의 생성항으로 다음과 같다.

$$P_k = -\overline{u'_i u'_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (10)$$

위에서 제시된 난류모형을 표준 $k-\epsilon$ 모형이라 한다. 표준 $k-\epsilon$ 모형에서 사용하는 난류점성계수 추정법은 계산의 경제성을 크게 증가시키나 난류의 비등방성의 정확성이 크게 떨어져 난류의 비등방성에 의해 발생하는 이차류를 제대로 계산할 수 없다. 따라서 비등방성이 강한 흐름을 모의하기 위해서는 이것이 고려된 모형을 사용할 필요가 있다.

2.3 비선형 $k-\epsilon$ 모형

본 연구에서 사용한 Speziale (1987)의 비선형 $k-\epsilon$ 모형은 레이놀즈응력과 변형을 텐서의 비선형관계를 다음과 같이 표현한다.

$$-\overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} + 2\nu_t S_{ij} + 4C_\mu^2 C_D \frac{k^3}{\epsilon^2} \left(S_{im} S_{mj} - \frac{1}{3} S_{mn} S_{nm} \delta_{ij} \right) + 4C_\mu^2 C_E \frac{k^3}{\epsilon^2} \left(\dot{S}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{S}_{mm} \delta_{ij} \right) \quad (11)$$

여기서 C_D 와 C_E 는 경험상수로 Speziale (1987)는 $C_D = C_E = 1.68$ 을 제시하였으며, Eq. (11)의 \dot{S}_{ij} 는 다음과 같다.

$$\dot{S}_{ij} = \frac{\partial S_{ij}}{\partial t} + u_k \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_k} - \frac{\partial u_i}{\partial x_k} S_{kj} - \frac{\partial u_j}{\partial x_k} S_{ki} \quad (12)$$

본 연구에서는 RANS 방정식과 $k-\epsilon$ 수송식을 계산하기 위해 엇갈린 격자체계를 사용하였다. Choi and Kang (2006)의 수치계산에서와 같은 300×80 크기의 격자구성을 하였으며 유한 체적법을 이용하였다. 여기에 Power-Law 차분기법(Patankar, 1980)과 SIMPLE 알고리즘(Patankar and Spalding, 1972)을 이용하였다. 벽에서의 경계조건으로 벽 법칙을 사용하였고 자유수면의 경계조건으로 Hossain and Rodi (1980)가 제시한 난류운동에너지의 소산율을 사용하였다.

3. 모형의 적용

3.1 적용 대상

본 연구에서는 식생개수로에서 평균 흐름과 난류구조를 수치모의하기 위해 비선형 $k-\epsilon$ 모형을 Nezu and Onitsuka (2001)의 실험에 적용하였다. Fig. 1에 부분식생 흐름의 개념도(정면도)를 제시하였다. Fig. 1에서 B 는 수로의 폭, H 는 수심, b_v 는 식생구간의 길이로 폭의 절반이다. Table 1은 실험수로의 재원정보이다. 표에서 제시된 Q 는 유량, S 는 수로의 경사, Fr 은 프루드수, 그리고 Re 는 레이놀즈수이다. 실험자료는 벽 근처 측정이 어렵기 때문에 $0.1 < y/B < 0.9$ 의 범위에서 주어졌다.

3.2 모의 결과

부분식생 조건의 개수로 흐름에서 발생하는 이차류의 양상을 파악하기 위하여 Fig. 2에 이차류의 벡터도를 제시하였다. 그림에서 제시된 속도벡터는 주 흐름방향 최대유속($\langle u \rangle_{max}$)으로 표준화 시킨 것이다. 모의 결과의 비교를 위하여 Nezu and Onitsuka

(2001)의 실험자료와 Choi and Kang (2006)의 RSM 모의결과를 제시하였다. 실험자료에 의하면 비식생 영역 및 식생 영역에서 동일하게 반시계방향의 큰 와(渦)가 생성되었음을 알 수 있다. 비선형 k-ε 모형에 의한 모의결과도 이와 같은 이차류의 양상을 잘 모의하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 우측의 벽 근처에 반시계 방향 자유수면 와(free surface vortex) 및 시계방향의 바닥 와(bottom vortex)가 모의된 것이 확인된다. Fig. 2(c)에 제시된 RSM 모의결과에 따르면 식생 영역과 비식생 영역을 기준으로 서로 반대방향으로 회전하는 큰 와(渦)가 존재하며, 바닥 부근에도 크기는 작지만 쌍와(twin vortices)가 있는 것이 확인 된다. 우측 벽면 모서리에는 반시계 방향으로 회전하는 자유수면 와(渦)도 존재하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 비식생 영역에서 모의된 큰 와(渦)와 자유수면 와(渦)가 유속 최대점 침강현상을 발생시키며 이는 실측된 평균유속 분포와 일치하지 않을 것으로 보인다. 그러나 이와 비슷한 연구를 수행한 Shimizu and Tsujimoto (1993)도 RSM과 거의 동일한 결과를 보였기 때문에 추후 더 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

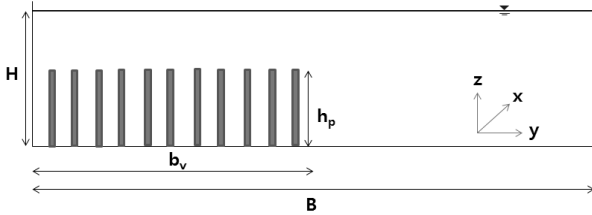
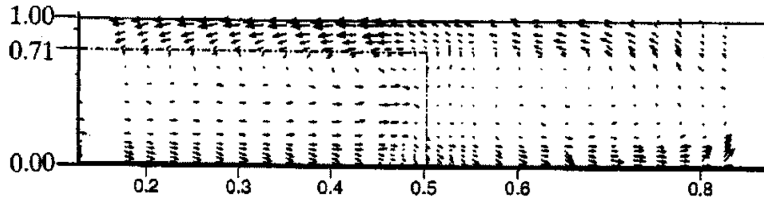


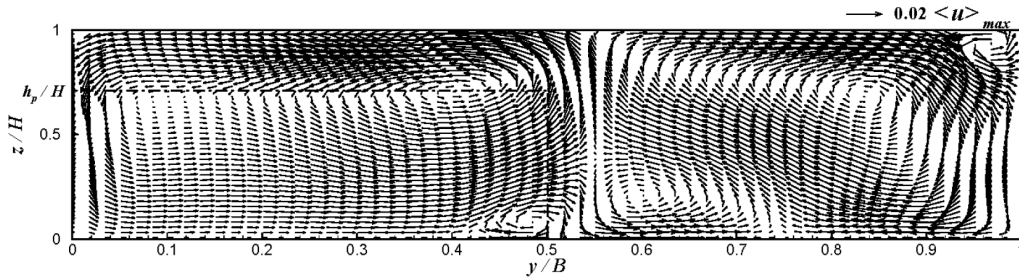
Fig. 1. Schematic View of a Partly-Vegetated Open-Channel

Table 1. Nezu and Onitsuka's Experimental Condition (2001)

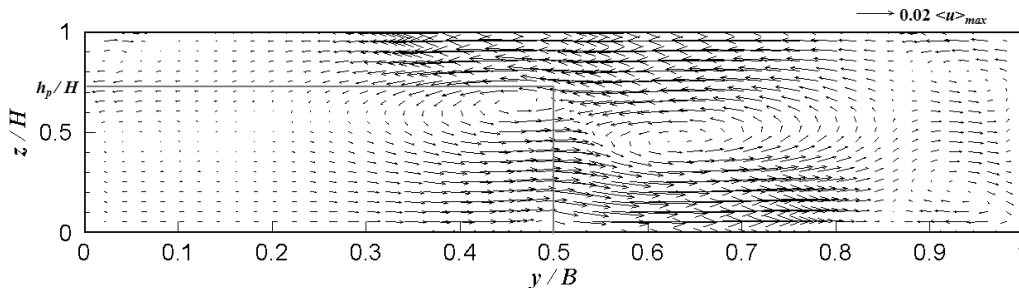
B (cm)	H (cm)	S	h_p (cm)	Fr	Re	a (m^{-1})
40	7.0	1/2700	5.0	0.24	1.33×10^3	20



(a) Nezu and Onitsuka (2001)

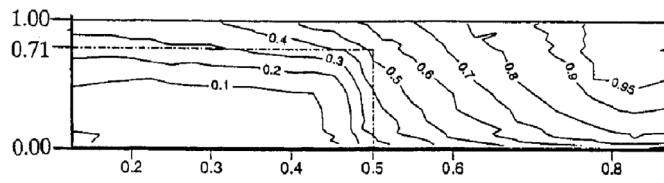


(b) Reynolds Stress Model (Choi and Kang, 2006)

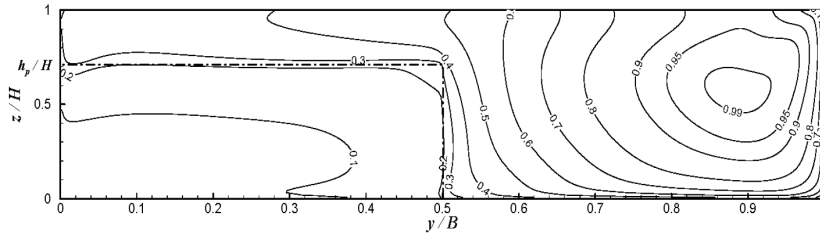


(c) Nonlinear $k-\epsilon$ Model

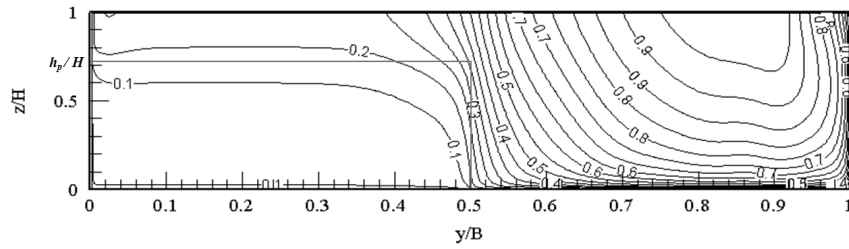
Fig. 2. Secondary Current Vectors



(a) Nezu and Onitsuka (2001)

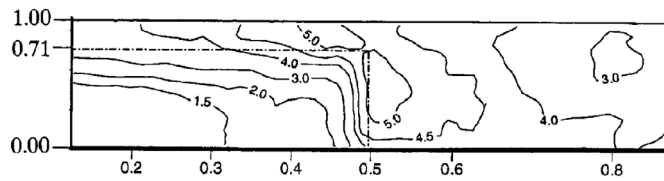


(b) Reynolds Stress Model (Choi and Kang, 2006)

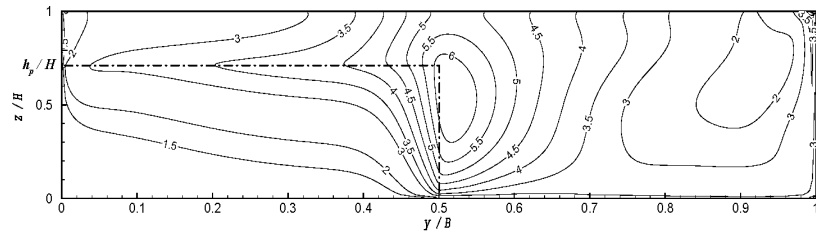


(c) Nonlinear $k-\varepsilon$ Model

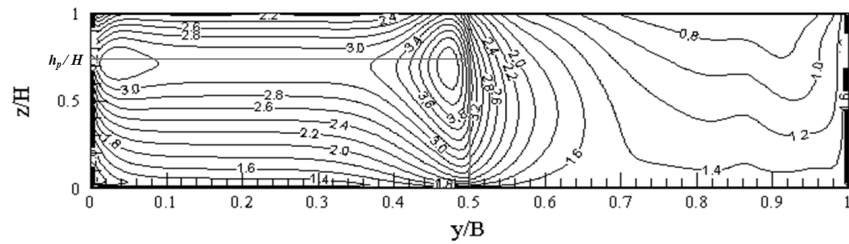
Fig. 3. Streamwise Mean Velocity \bar{u}/\bar{u}_{\max}



(a) Nezu and Onitsuka (2001)



(b) Reynolds Stress Model (Choi and Kang, 2006)



(c) Nonlinear $k-\varepsilon$ Model

Fig. 4. x-Component Turbulence Intensity $(\sqrt{u'u'})/u_{*b}$

부분식생 개수로 흐름에서 주 흐름방향 흐름의 양상을 파악하기 위하여 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3(a)는 Nezu and Onitsuka (2001)의 실험 측정 결과, Figs. 3(b) and (c)는 각각 비선형 $k-\epsilon$ 모형과 RSM으로 모의된 결과이다. 세 결과에서 식생 영역에서 등유속선이 수평에 가까운 것을 볼 수 있다. RSM은 비식생 영역에서 유속 최대점 침강현상을 뚜렷하게 모의하였지만 실험 결과와 비선형 $k-\epsilon$ 모형 모의결과에서는 보이지 않았다. 이는 비식생 영역에서 실험과 비선형 $k-\epsilon$ 모형이 RSM모형과 이차류 양상이 반대인 것에 기인한 것으로 볼 수 있다. 유속 최대점 침강현상은 자유수면 근처에서 음의 유속경사를 만들기 때문에 레이놀즈응력 $(-\overline{u'w'})$ 의 분포에 중요한 연관이 있다.

Fig. 4는 하상 전단속도로 무차원화된 x 방향 성분의 난류 강도를 나타낸다. 비선형 $k-\epsilon$ 모형과 RSM으로 계산된 난류 강도를 실험 결과와 비교하였을 때 경향이 잘 일치하는 것으로 나타났다. 세 가지 경우에서 모두, 수로 중심의 식생 영역과 비식생 영역의 경계에서 난류강도의 최대점이 위치하는 것을 볼 수 있다. 하지만 식생 영역에서의 난류강도의 크기는 실험결과의 경우 바닥에서 자유 수면으로 올라감에 따라 난류강도의 크기가 증가하나 두 모의결과에서는 식생 영역과 비식생 영역의 경계면에서 올라가

면서 크기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그 외의 구간에서 정량적으로 보았을 때, RSM은 전반적으로 난류 강도의 크기가 잘 일치하는 편이나 비선형 $k-\epsilon$ 모형의 경우 실험 결과에 비해 과소산정하는 것을 알 수 있다.

부분식생 개수로에서 레이놀즈 응력의 분포양상을 파악하기 위하여 Figs. 5 and 6에 각각 레이놀즈응력 $-(\overline{u'w'})/u_{*b}^2$ 와 $-(\overline{u'v'})/u_{*b}^2$ 을 모의하여 도시하였다. 여기서 u_{*b} 는 하상전단속도로 $u_{*b} = \sqrt{\tau_b/\rho}$ 로 계산한다. RSM과 마찬가지로 비선형 $k-\epsilon$ 모형도 실험 결과와 전체적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 세 가지의 경우 모두 응력의 최대점이 식생 영역과 비식생 영역의 경계가 되는 수로 중앙의 식생 높이에서 나타났다. 그 크기는 실험결과에 비해 다소 크게 산정되었다. 비식생 영역 자유수면 근처에서 세 경우 모두 음의 응력 값을 볼 수 있다. RSM은 비식생 영역 자유수면 전반에 걸쳐 음의 응력 값이 형성되었고 실험 결과에서는 $y/B > 0.75$ 에서 측정되었다. 이는 Fig. 2(c)에서 뚜렷하게 보인 유속 최대점 침강현상에 의한 주 흐름방향 유속의 x_3 방향 경사가 음의 값을 가지는 것과 밀접한 관계가 있다. 따라서 실험결과에서도 주 흐름방향 최대 유속은 침강했을 것으로 예측할 수 있다. 비선형 $k-\epsilon$ 모형의 경우 음의 응력 값을 $y/B > 0.9$ 에서만 볼 수 있는데

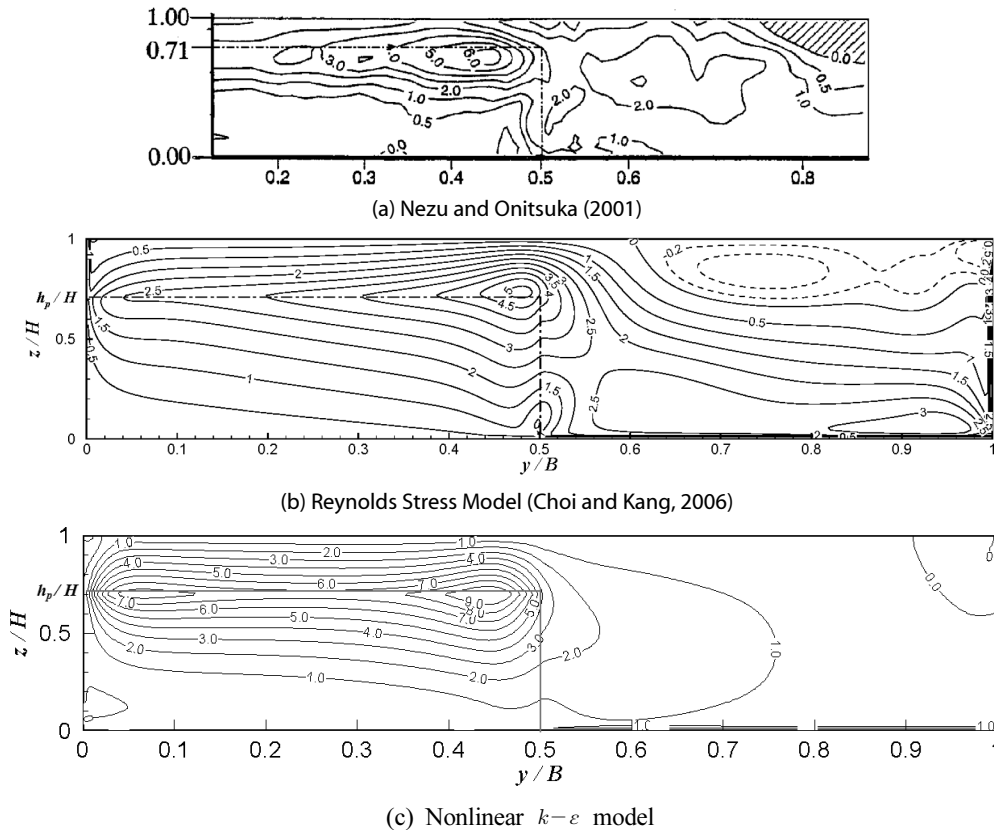


Fig. 5. Spanwise Component of Reynolds Stress $-(\overline{u'w'})/u_{*b}^2$

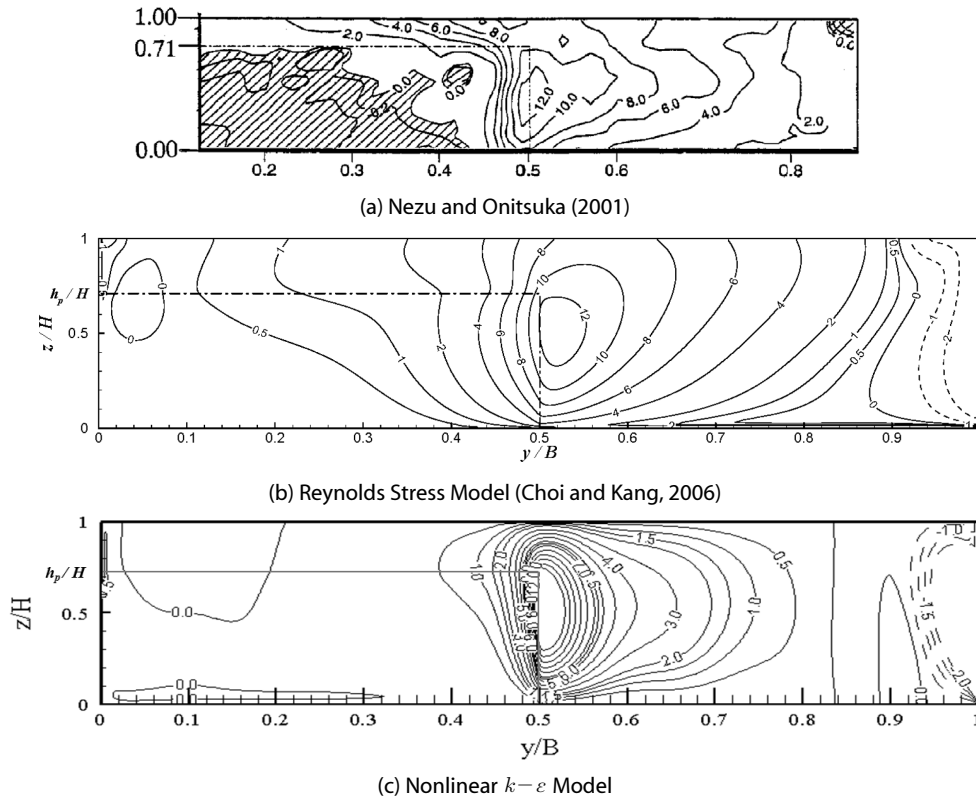


Fig. 6. Spanwise Component of Reynolds Stress $-\overline{u'v'}/u_{*b}^2$

이는 실험 결과에 비해 벽에서 좁은 범위로 작게 산정된 것이므로 유속 최대점 침강현상을 전혀 모의하지 못하는 것을 알 수 있게 한다.

Fig. 6은 횡방향의 레이놀즈응력 $-\overline{u'v'}/u_{*b}^2$ 의 분포를 도시한 것이다. 실험 결과와 마찬가지로 식생 영역에서는 굉장히 작은 값의 레이놀즈응력 값이 모의되었다. 레이놀즈응력 $-\overline{u'v'}$ 은 운동량 교환의 강도를 나타내는데, 이는 횡방향으로 운동량 전달이 이 영역 내에서 무시할 만큼 적다는 것을 나타낸다. 세 가지 모두의 경우에서 무차원화된 레이놀즈응력 $-\overline{u'v'}/u_{*b}^2$ 의 최대점이 식생 높이 보다 살짝 낮은 높이의 영역 경계에서 나타났다. RSM의 경우 그 값이 정량적으로 잘 일치하지만 비선형 $k-\epsilon$ 모형의 경우 실험 결과에 비해 비교적 작은 값이 산정된 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 비선형 $k-\epsilon$ 모형을 이용하여 부분 식생 개수로 흐름을 수치 모의하였다. 비선형 $k-\epsilon$ 모형에 의한 결과를 Nezu and Onitsuka (2001)의 실험 결과, 그리고 Choi and Kang (2006)의 RSM 수치 모의 결과와 비교하여 적용성을 확인하고 평균흐름과

난류구조를 분석하였다. 부분 식생에 의해 난류강도 및 레이놀즈응력이 식생 영역과 비식생 영역 경계에서 크게 발달하면서 흐름 양상이 변화하는 것을 확인하였다. 주 흐름 방향의 평균 유속 분포에 대해 비선형 $k-\epsilon$ 모형은 실험결과와 비교해 보면 유속 최대점의 분포와 식생 영역에서 등유속선이 수평에 가까운 것 등 정성적으로 잘 예측하는 것으로 확인되었다. 그러나 RSM은 유속 최대점 침강현상을 모의하였지만 비선형 $k-\epsilon$ 모형은 모의하지 못했다. 이차흐름 유속장의 경우 중심부를 경계로 비식생 영역과 식생 영역에서 나타나는 와(渦)를 실험결과와 비교했을 때 비교적 정확히 예측했을 뿐만 아니라 비식생 영역 자유수면 근처에서 발생하는 작은 크기의 와(渦) 또한 잘 예측하였다. x_1 성분의 난류강도의 경우 실험결과와 비교했을 때 접합부에서 최대점이 발생하는 것과 전체적 분포를 정성적으로 비교적 잘 모의하였다. 그러나 실험 결과에 비해 그 크기는 다소 작게 모의되었다. 레이놀즈응력 $\overline{u'w'}$ 과 $\overline{u'v'}$ 의 경우 식생 영역과 비식생 영역 경계에서 응력의 최대점이 위치하는 것을 잘 모의하였지만 RSM만큼 정량적으로는 잘 예측하지는 못했다. 이를 종합해볼 때 비선형 $k-\epsilon$ 모형이 흐름의 전반적인 양상은 잘 모의하지만 난류량에 대하여 더 많은 실험자료와 비교 연구해 볼 필요가 있을 것으로 보인다.

감사의 글

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

References

- Boussinesq, J. (1877). “Essai sur la théorie des eaux courantes.” *Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Sciences*, Vol. 23, No. 1, pp. 1-680.
- Dunn, C. J. (1966). *Experimental determination of drag coefficients in open-channel with simulated vegetation*, M.S. Dissertation, University of Illinois at Urbana Champaign, Urbana, IL.
- Choi, S. U. and Kang, H. S. (2006). “Numerical investigations of mean 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.
- 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 Research, IAHR*, Vol. 39, No. 3, pp. 303-310.
- Hossain, M. S. and Rodi, W. (1980). “Mathematical modeling of vertical mixing in stratified channel flow.” *Proceedings of the 2nd Symposium on Stratified Flow*, Trondheim, Norway.
- Lauder, B. E. and Spalding, D. B. (1974). “The numerical computation of turbulent flow.” *Computational Methods in Applied Mechanics*, Vol. 3, pp. 269-289.
- Muller, A. and Studer, X. (1979). “Secondary flow in an open channel.” *Proceedings of the 18th IAHR Congress*, Cagliari, Vol. 3, pp. 19-24.
- 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 Nakagawa, H. (1984). “Cellular secondary currents in straight conduit.” *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 110, No. 2, pp. 173-193.
- Nezu, I. and Onitsuka, K. (2001). “Turbulent structures in partly vegetated open-channel flows with LDA and PIV measurements.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, No. 6, pp. 629-642.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere Publishing Corporation, McGraw Hill Book Company, New York, NY.
- Patankar, S. V. and Spalding, D. B. (1972). “A calculation procedure for heat, Mass and momentum transfer in three dimensional parabolic flow.” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, No. 10, pp. 1787-1806.
- 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.
- Speziale, C. G. (1987). “On nonlinear $k-l$ and $k-\epsilon$ models of turbulence.” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 178, pp. 459-475.
- Stoesser, T., Neary, V. and Wilson, C. A. M. E. (2004). “Modeling vegetated channel flows.” *WSEAS Conference*, Corfu Iland, Greece.
- Wilson, C. A. M. E., Stoesser, T. and Bates, P. D. (2005). *Modeling of open channel flow through vegetation, Computational fluid dynamics: Applications in Environmental Hydraulics*, Paul D. Bates, Stuart N. Lane and Robert I. Ferguson ed., John Wiley & Sons, New York, NY.
- Xiaohui, S. and Li, C. W. (2002). “Large eddy simulation of free surface turbulent flow in partly vegetated open-channels.” *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 39, pp. 919-937.