

# 식생된 개수로 흐름에서의 난류의 비등방성

## Anisotropy of Turbulence in Vegetated Open-Channel Flows

강 형 식\* / 최 성 욱\*\*  
Kang, Hyeongsik / Choi, Sung-Uk

### Abstract

This paper investigates the impacts of turbulent anisotropy on the mean flow and turbulence structures in vegetated open-channel flows. The Reynolds stress model, which is an anisotropic turbulence model, is used for the turbulence closure. Plain open-channel flows and vegetated flows with emergent and submerged plants are simulated. Computed profiles of the mean velocity and turbulence structures are compared with measured data available in the literature. Comparisons are also made with the predictions by the  $k-\epsilon$  model and by the algebraic stress model. For plain open-channel flows and open-channel flows with emergent vegetation, the mean velocity and Reynolds stress profiles by isotropic and anisotropic turbulence models were hardly distinguished and they agreed well with measured data. This means that the mean flow and Reynolds stress is hardly affected by anisotropy of turbulence. However, anisotropy of turbulence due to the damping effect near the bottom and free surface is successfully simulated only by the Reynolds stress model. In open-channel flows with submerged vegetation, anisotropy of turbulence is strengthened near the vegetation height. The Reynolds stress model predicts the mean velocity and turbulence intensity better than the algebraic stress model or the  $k-\epsilon$  model. However, above the vegetation height, the  $k-\epsilon$  model overestimates the mean velocity and underestimates turbulence intensity. Sediment transport capacity of vegetated open-channel flows is also investigated by using the computed profiles. It is shown that the isotropic turbulence model underestimates seriously suspended load.

*keywords* : Vegetated open-channel flow, Reynolds stress model, anisotropic turbulence, turbulence structure, suspended load

### 요 지

본 논문은 식생된 개수로 흐름에서 난류의 비등방성이 평균유속 및 난류구조에 미치는 영향을 파악하기 위한 수치모의 연구이다. 비등방성 난류모형인 레이놀즈응력모형을 이용하여 식생이 없는 일반 개수로 흐름과 침수 및 정수 식생된 개수로 흐름에서의 평균유속 및 난류구조를 수치모의하였다. 수치모의 결과를 기존의 실험결과 및  $k-\epsilon$  모형과 응력대수식모형에 의한 계산 결과와 비교하였다. 식생이 없는 일반 개수로 흐름과 정수식생된 개수로 흐름에서의 평균유속과 레이놀즈응력을 계산한 결과 등방성 및 비등방성 난류모형에 의한 해석 결과의 차이가 거의 나타나지 않았다. 즉, 난류의 비등방성의 영향이 매우 작은 것으로 나타났다. 그러나 자유수면 및 바닥 근처에서 발생하는 난

\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사후연구원  
Post-doctoral Research Fellow, School of Civil & Environmental Engineering, Yonsei University  
(e-mail: kanghs@yonsei.ac.kr)

\*\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수  
Associate Professor, School of Civil & Environmental Engineering, Yonsei University  
(e-mail: schoi@yonsei.ac.kr)

류의 감쇠효과에 의한 난류의 비등방성은 레이놀즈응력이 가장 잘 예측하는 것으로 나타났다. 침수식생된 개수로 흐름의 경우 식생높이 부근에서 난류의 비등방성이 강하게 발생하는 것으로 나타났다. 계산된 평균유속 및 난류구조는 레이놀즈응력모형이 다른 모형 보다 가장 정확한 예측을 수행하였으며, 등방성 모형인  $k-\epsilon$  모형은 식생높이 보다 높은 영역에서 평균유속 및 난류강도를 각각 과대 및 과소 예측하는 것으로 나타났다. 또한 계산된 결과를 이용하여 식생된 개수로 흐름에서의 부유사량을 산정한 결과 등방성 난류모형이 부유사량을 과소 산정하는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 식생된 개수로 흐름, 레이놀즈응력모형, 난류의 비등방성, 난류구조, 부유사량

## 1. 서 론

대부분의 자연하천에는 식생이 서식하고 있으며, 하도 내 식생은 하천의 수리특성 및 주변 생태계 변화에 큰 영향을 미친다. 식생이 없는 일반 개수로 흐름에서는 하상 거칠기에 의한 표면저항과 하상형상에 의한 형상항력이 흐름 저항의 주된 요소이다. 그러나 식생된 개수로 흐름에서는 바닥 전단력 뿐만 아니라 식생에 의한 항력에 의해 저항력이 결정되며, 이로 인하여 일반 개수로와 다른 평균흐름 및 난류구조를 갖는다. 식생에 의한 항력은 유속을 감소시켜 수위를 상승시키며, 바닥 전단력을 감소시켜 유사 퇴적을 유발한다(Ward 등, 1984). 또한 식생높이 보다 높은 구간과 낮은 구간에서의 유속차이에 의해 식생높이 부근에서 강한 전단층이 형성되며, 이로 인하여 난류운동에너지 및 레이놀즈응력과 같은 난류량의 수직구조가 변하게 된다. 식생높이 보다 낮은 구간에서는 항력에 의해 평균유속이 수직방향으로 균일한 분포를 갖으며, 이로 인하여 레이놀즈응력이 감소하게 된다. 레이놀즈응력은 난류확산계수에 큰 영향을 미치는 난류량이다. 따라서 식생에 의한 평균흐름 및 난류구조의 변화는 유사, 영양 물질, 용존 산소 등에 영향을 미치고 이는 결국 수중 생물의 서식에 변화를 준다.

개수로의 난류흐름을 수치모의 하기 위해서는 난류모형이 필요하다. 이중 표준  $k-\epsilon$  모형 및 응력대수식모형(Algebraic Stress Model: ASM)과 같은 2-방정식 난류모형은 여러 공학 문제에 가장 많이 적용되는 모형이다. 특히, 표준  $k-\epsilon$  모형은 많은 실험결과와의 비교를 통해 모형상수에 대한 정보가 매우 풍부하다는 장점이 있다. 그러나 표준  $k-\epsilon$  모형은 레이놀즈응력이 속도경사와 비례한다는 난류점성개념(eddy viscosity concept)에 의존하고 있는 등방성 난류모형으므로 간단한 전단흐름 외의 복잡한 난류 흐름을 정확히 예측할 수 없다. 또한 응력대수식모형은 표준  $k-\epsilon$  모형의 단점인 등방성 난류를 극복하기 위해 개발된 모형으로서, 각 레이놀즈응력의 대수식을 해석하여 난류의 비등방성을 고려

하는 모형이다. 응력대수식모형에서 대수식 형태의 레이놀즈응력을 유도하기 위한 기본 가정은 Rodi(1976)에 의해 제안되었으며, 그 후 Naot and Rodi(1982)가 각각의 레이놀즈응력의 대수식을 유도하여 처음으로 개수로 흐름의 3차원 수치모의를 수행하였다. 그러나 Naot and Rodi(1982)의 응력대수식모형은 자유수면 근처에서 난류의 비등방성을 정확히 예측하지 못하는 것으로 나타났다(Cokljat and Younis, 1995).

일반적으로 개수로의 자유수면 근처에서는 벽 경계와 마찬가지로 난류의 감쇠효과(damping effect)에 의해 난류운동에너지의 재분배 현상이 발생하게 된다. 즉, 경계면과 수직인 방향으로의 난류강도는 감소되고, 경계면과 평행인 방향으로의 난류강도는 증가하게 되어 결국 난류의 비등방성이 증가한다. 또한 Nepf and Vivoni(2000)의 실내 실험 결과에 따르면 식생된 개수로 흐름의 경우 식생높이 근처에서 난류의 비등방성이 강하게 발생되고, 식생높이 보다 낮은 구간에서는 비등방성이 약화되는 것으로 나타났다. 따라서 식생된 개수로 흐름을 정확히 예측하기 위해서는 레이놀즈응력모형(Reynolds Stress Model: RSM)이 필요하다. 레이놀즈응력모형은 기존의 2-방정식 난류모형과는 달리 난류점성개념을 사용하지 않고 레이놀즈응력의 수송방정식을 직접 해석하기 때문에 비등방성 난류흐름을 가장 정확히 예측할 수 있는 모형이다.

식생된 개수로 흐름에 난류모형을 적용하기 시작한 것은 비교적 최근의 일이다(Bulke and Stolzenbach, 1983; Shimizu and Tsujimoto, 1994; Lopez and Garcia, 1988, 2001; Neary, 2003). Bulke and Stolzenbach(1983)은 처음으로  $k-\epsilon$  모형을 이용하여 식생된 개수로 흐름을 수치모의 하였으며, 후류에 의한 난류생성항에 포함된 항력계수에 대한 연구의 필요성을 언급하였다. Shimizu and Tsujimoto(1994)는 식생된 개수로 흐름에 대한 실내 실험을 수행하고 응력대수식모형을 이용하여 수치모의하였다. 실험 및 수치모의 결과를 이용하여 식생에 의한 항력계수 값을 보정하였다. Lopez and Garcia(2001)와 Neary(2003)는 각각 응력대수식모형과

k-ε 모형을 이용하여 침수식생된 개수로 흐름에서의 평균유속 및 난류구조를 수치모의 하였으며, Lopez and Garcia(1998)는 Lopez and Garcia(2001)와 동일한 모형을 이용하여 식생된 개수로 흐름에서 부유사량을 모의 하였다. 이상의 연구동향을 살펴본 결과 식생된 개수로 흐름을 수치모의하기 위해 사용된 모형은 모두 2-방정식 난류모형인 것을 알 수 있다. 또한 2-방정식 난류모형에 의해 계산된 평균유속을 살펴보면 식생높이 보다 높은 구간에서 실험 결과보다 과대 산정하는 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 2-방정식 모형이 난류의 비등방성을 정확히 예측할 수 없기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 이와 같은 사실은 본 연구에서 레이놀즈응력모형을 이용하여 식생된 개수로 흐름을 수치모의한 중요한 연구 동기이다.

본 연구의 목적은 레이놀즈응력모형을 이용하여 식생된 개수로 흐름에서 난류의 비등방성이 흐름구조에 미치는 영향을 파악하는 것이다. 일차원의 수직모형을 구성하여 식생이 없는 일반 개수로 흐름과 침수(沈水: submerged) 및 정수(挺水: emergent) 식생된 개수로 흐름을 수치모의 하였다. 각각의 개수로 흐름에서의 평균유속 분포와 난류구조를 계산하였으며, 계산결과를 응력대수식모형과 k-ε 모형 및 기존의 수리실험 결과와 비교하였다. 또한 식생된 개수로 흐름에서 난류의 비등방성이 부유사량에 미치는 영향에 대해 살펴보았다.

## 2. 지배방정식

식생된 개수로의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 개수로의 주 흐름방향을 x, 횡 방향을 y, 바닥면에서 수직인 방향을 z로 정하였다. Fig. 1과 같이 균일한 지름 및 높이를 갖는 식생이 동일간격으로 배열되었

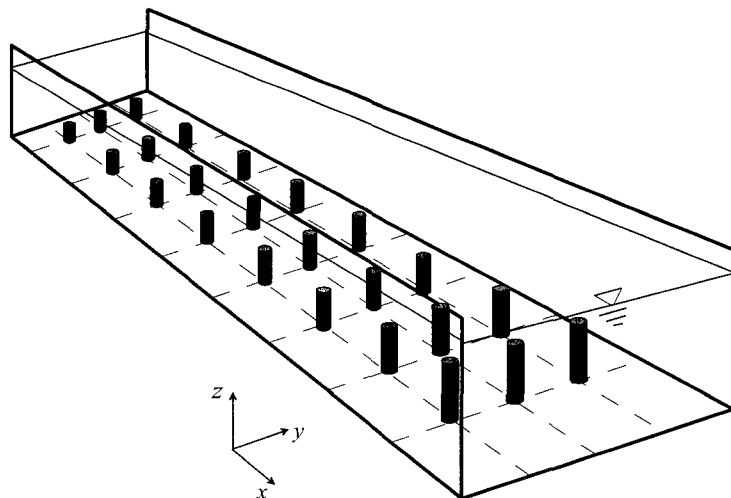


Fig. 1. Schematic View of Vegetated Open-Channel

고 레이놀즈 수가 충분히 큰 경우 Navier-Stokes 방정식을 시간 및 공간평균하면 다음과 같은 운동량방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial z} - \langle \bar{u}'w' \rangle \right) - f_x + gS_0 \quad (1)$$

여기서  $\bar{u}$ 와  $\langle \bar{u} \rangle$ 는 각각 순간 유속  $u$ 에 대한 시간 및 공간평균 성분이고,  $u'$ 와  $w'$ 는 각각 시간 및 공간에 대한 변동성분이다. Eq. (1)에서  $\langle \bar{u} \rangle$ 는 시간 및 공간평균된 흐름방향의 유속이며,  $\nu$ 는 유체의 동점성계수,  $-\langle \bar{u}'w' \rangle$ 는 레이놀즈응력,  $f_x$ 는 식생에 의한 항력,  $g$ 는 중력가속도,  $S_0$ 는 바닥경사를 나타낸다. Eq. (1)에서 흐름으로 인하여 식생에 작용하는 단위체적당 항력은 다음과 같다.

$$f_x = \frac{1}{2} C_D a \rho \langle \bar{u} \rangle \sqrt{\langle \bar{u} \rangle^2} \quad (2)$$

여기서  $C_D$ 는 항력계수,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $a$ 는 식생 밀도로서 식생 간격에 의한 하상의 단위면적과 식생지름의 비로 결정된다. 항력계수  $C_D$ 는 상류단 식생에 의해 발생된 후류에 영향을 받으며, 식생 간격이 작을수록 하류단 식생의 항력계수는 더 작아진다(Nepf, 1999).

## 3. 난류모형

지배방정식의 폐합문제(closure problem)를 해결하기 위해서는 난류모형이 필요하다. 본 연구에서는 등방성 난류모형인 k-ε 모형과 비등방성 모형인 레이놀즈응력모형(RSM: Reynolds Stress Model) 및 응력대수

식모형(ASM: Algebraic Stress Model)과 같은 3가지 난류모형을 사용하여 수치모의 하고 계산결과를 비교 하였다.

### 3.1 k-ε모형

k-ε 모형은 레이놀즈응력을 해석하기 위해 다음과 같은 난류점성개념을 이용한다.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$

여기서  $\nu_t$ 는 난류동점성계수로서 다음과 같은 Prandtl-Kolmogorov식으로부터 구할 수 있다.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

여기서  $C_\mu (=0.09)$ 는 경험상수이고,  $k$ 와  $\varepsilon$ 은 각각 난류 운동에너지와 난류운동에너지의 소산률로서 다음과 같은 수송방정식을 이용한다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\nu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \nu_t \left( \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \right)^2 + C_{fk} f_x \overline{u} - \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\nu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left( \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \right)^2 + \frac{\varepsilon}{k} C_{f\varepsilon} f_x \overline{u} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

여기서  $\nu_{eff}$ 는 유효 동점성계수(=  $\nu + \nu_t$ ),  $\sigma_k (= 1.0)$ ,  $\sigma_\varepsilon (= 1.3)$ ,  $C_1 (= 1.44)$ ,  $C_2 (= 1.92)$ 는 k-ε 모형의 경험상수이고,  $C_{fk}$ 과  $C_{f\varepsilon}$ 는 식생에 의한 항력계수로서 Lopez and Garcia(1998)는  $C_{fk} = 1.0$ 와  $C_{f\varepsilon} = 1.33$ 을 사용하였다.

### 3.2 ASM 모형

ASM은 레이놀즈응력을 위한 대수식을 해석하여 난류의 비등방성을 모의할 수 있는 난류모형이다. Rodi (1976)는 레이놀즈응력의 수송방정식에서 수송항과 확산항의 합이 난류운동에너지의 수송항과 확산항의 합과 비례한다는 가정 하에 다음과 같은 레이놀즈응력을 위한 대수식을 제시하였다.

$$R_{ij} = k \left[ \frac{2}{3} \delta_{ij} + \frac{(1-C_2)(P_j/\varepsilon - 2/3 \cdot \delta_j P/\varepsilon)}{C_1 + P/\varepsilon - 1} \right] \quad (7)$$

여기서  $R_{ij}$ 는 레이놀즈응력(=  $\overline{u_i u_j}$ ),  $P$ 는 난류운동에너지

의 생성항,  $R_{ij}$ 는 레이놀즈응력의 생성항,  $C_1$ 과  $C_2$ 는 경험상수이다. Eqs. (4)와 (7)로부터 경험상수  $C_\mu$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$C_\mu = \frac{2}{3} \frac{1-C_2}{C_1} \frac{C_1 - 1 + C_2 P/\varepsilon}{(C_1 - 1 + P/\varepsilon)^2} \quad (8)$$

여기서 경험상수  $C_1$ 과  $C_2$ 는 Shimizu and Tsujimoto (1994)가 제안한  $C_1 = 1.5$ 와  $C_2 = 0.6$ 을 사용하였다.

### 3.3 RSM 모형

RSM은 레이놀즈응력을 위해 다음과 같은 레이놀즈 응력의 수송방정식을 해석한다.

$$\frac{DR_{ij}}{Dt} = - \left( R_{ik} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} + R_{jk} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \right) + \frac{1}{\rho} \left( \overline{u_j} \left\langle \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} \right\rangle + \overline{u_i} \left\langle \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j} \right\rangle \right) + D_{ij} - \epsilon_{ij} + \Pi_{ij} \quad (9)$$

여기서 우변의 첫번째 항은 전단에 의한 레이놀즈응력의 생성항, 두번째 항은 후류에 의한 생성항,  $D_{ij}$ 는 난류 확산항,  $\epsilon_{ij}$ 는 소산률항,  $\Pi_{ij}$ 는 압력-변형률 상관항이다. Eq. (9)에서  $\rho^{-1} \langle \partial \overline{p} / \partial x_i \rangle$ 는 식생에 의한 항력항으로서 다음과 같다.

$$\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{1}{2} C_D a \overline{u_i}^2 \quad (10)$$

Eq. (9)에서 생성항을 제외한 각각의 항들은 모두 모델링이 필요하다. 강형식과 최성욱(2002)은 개수로 흐름에서 3가지의 난류 확산항, 3가지의 소산률항, 그리고 5가지의 압력-변형률 상관항에 대한 기존의 모형을 비교하여 각각의 예측 능력을 평가하였다. 그 결과 난류 확산항과 소산률항, 압력변형률 상관항에 대해서 각각 Mellor and Herring(1973) 모형, Hanjalic and Launder(1972) 모형, 그리고 Speziale, Sarkar, Gatski(1991) 모형이 개수로 흐름을 가장 정확히 예측하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 사용된 이들의 모형은 다음과 같다.

$$D_{ij} = C_s \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \frac{k^2}{\varepsilon} \left( \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_k} + \frac{\partial R_{ik}}{\partial x_j} + \frac{\partial R_{jk}}{\partial x_i} \right) \right] \quad (11)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{\varepsilon}{k} R_{ij} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{ij} = & \alpha_0 \epsilon b_{ij} + \alpha_1 \epsilon (b_{ik} b_{jk} - 1/3 \cdot b_{mn} b_{mn} \delta_{ij}) \\ & + \alpha_2 k S_{ij} + \alpha_3 R_i b_{ij} \\ & + \alpha_4 k (b_{ik} S_{jk} + b_{jk} S_{ik} - 2/3 \cdot b_{kl} S_{kl} \delta_{ij}) \\ & + \alpha_5 k (b_{ik} W_{jk} + b_{jk} W_{ik}) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서  $C_s$ 와  $\alpha_0$ - $\alpha_5$ 는 모형상수로서  $C_s = 0.22/3$ ,  $\alpha_0 = -3.4$ ,  $\alpha_1 = 4.2$ ,  $\alpha_2 = 0.8 - 1.3(b_{mn} b_{mn})^{1/2}$ ,  $\alpha_3 = -1.8$ ,  $\alpha_4 = 1.25$ ,  $\alpha_5 = 0.4$ 의 값이 사용되었다. 또한  $b_{ij}$ 는 난류의 비등방 텐서(anisotropy tensor),  $S_{ij}$ 는 변형률텐서(rate of the strain tensor),  $W_{ij}$ 는 회전텐서(rotation tensor)이다.

현재까지 개발된 대부분의 레이놀즈응력모형은 주로 자유수면이 없는 내부흐름에 대해 개발되었다. 따라서 개수로 흐름을 수치모의 하기 위해서는 자유수면에서 발생하는 난류의 비등방성 효과를 고려해야 한다. 본 연구에서는 다음과 같이 Gibson and Launder(1978) 및 Shir(1973)가 제시한 모형을 위의 Eq. (13)과 같은 압력-변형률 상관항 모형에 포함시켜 수치모의 하였다.

$$\begin{aligned} \Pi_{ij} = & C_{fs,1} \frac{\epsilon}{k} (R_{ni} \delta_{ij} - 3/2 R_{ni} \delta_{nj} - 3/2 R_{nj} \delta_{ni}) f_{fs} \\ & + C_{fs,2} \frac{\epsilon}{k} (\Pi_{nn,2} \delta_{ij} - 3/2 \Pi_{ni,2} \delta_{nj} - 3/2 \Pi_{nj,2} \delta_{ni}) f_{fs} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서  $C_{fs,1}$ (= 0.5)과  $C_{fs,2}$ (= 0.1)는 모형상수,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta,  $\Pi_{ij,2}$ 는 평균유속 경사와 변동속도 성분에 의한 압력-변형률 상관항,  $f_{fs}$ 는 자유수면 감쇠함수(damping function)로서 다음과 같다.

$$f_{fs} = \left( \frac{L}{z_{fs}^{-1} + C_f L} \right)^2 \quad (15)$$

여기서  $C_f$ (= 0.16)는 모형상수,  $z_{fs}$ 는 자유수면으로부터 수직거리, 그리고  $L$ 은 난류의 특성길이로서 다음과 같다.

$$L = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / (\kappa \epsilon) \quad (16)$$

여기서  $\kappa$ 는 von-Karman 상수이다.

#### 4. 경계조건

바닥경계에서는 레이놀즈응력을 제외한 모든 변수에 대해 벽법칙(law of the wall)을 사용하였다. 또한 레이놀즈응력에 대해서는 Launder et al. (1975)이 제시한 다음 값을 적용하였다.

$$(\overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}, \overline{u'w'}) = (1.176k, 0.246k, 0.576k, 0.24k) \quad (17)$$

자유수면에서는 난류운동에너지의 소산률을 제외한 모든 변수에 대하여 대칭평면조건을 적용하였다. 난류운동에너지의 소산률에 대해서는 다음과 같은 Hossain and Rodi(1980)가 제시한 자유수면 경계조건을 이용하였다.

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{1/2}}{\kappa h} \quad (18)$$

본 연구에서는 모든 모형에 대하여 동일하게 수심방향으로 100개의 격자점을 사용하였으며 지배방정식을 유한체적법(finite volume method)에 의해 수치해석 하였다.

### 5. 평균흐름 및 난류구조

개발된 난류모형을 이용하여 식생이 없는 일반 개수로 흐름과 식생된 개수로 흐름을 수치모의 하였다. 식생된 개수로 흐름에서의 식생조건은 침수식생과 정수식생 조건이 모의되었다. 각각의 흐름에서의 평균유속과 난류구조를 수치모의하고 기존의 실험결과와 비교하였다.

#### 5.1 식생이 없는 일반 개수로 흐름

Fig. 2는 일반 개수로 흐름에서의 평균유속 및 난류구조를 보여준다. 수치모의 조건은 Nezu and Nakayama(1999)의 실험조건을 이용하였다. Nezu and Nakayama(1999)는 매끄러운 하상을 갖는 개수로 흐름에서의 순간유속장을 LDV를 이용하여 측정하였다. 실험조건으로는 바닥경사( $S_0$ ) 1/6000, 수심( $h$ ) 0.05 m, 그리고 Froude 수는 0.23이다. Fig. 2(a)는 바닥으로부터의 무차원 거리  $Z'$ (=  $u_* z / \nu$ )에 따른 무차원 유속  $U'$ (=  $\overline{u} / u_*$ ) 분포도를 보여준다. Fig. 2(a)를 살펴보면 등방성 및 비등방성의 세 가지 난류모형이 모두 실험결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 2(b)는 레이놀즈응력 분포도이다. Fig. 2(b)를 살펴보면 레이놀즈응력 분포는 바닥 근처에서 최대를 이루고 선형적으로 감소하여 자유수면에서 거의 영이 되는 것을 볼 수 있다. 또한 바닥 근처를 제외한 대부분의 영역에서 세 가지의 난류모형에 의한 계산결과가 실험결과와 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 즉, 일반 개수로 흐름에서의 평균유속과 레이놀즈응력은 난류의 비등방성에 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

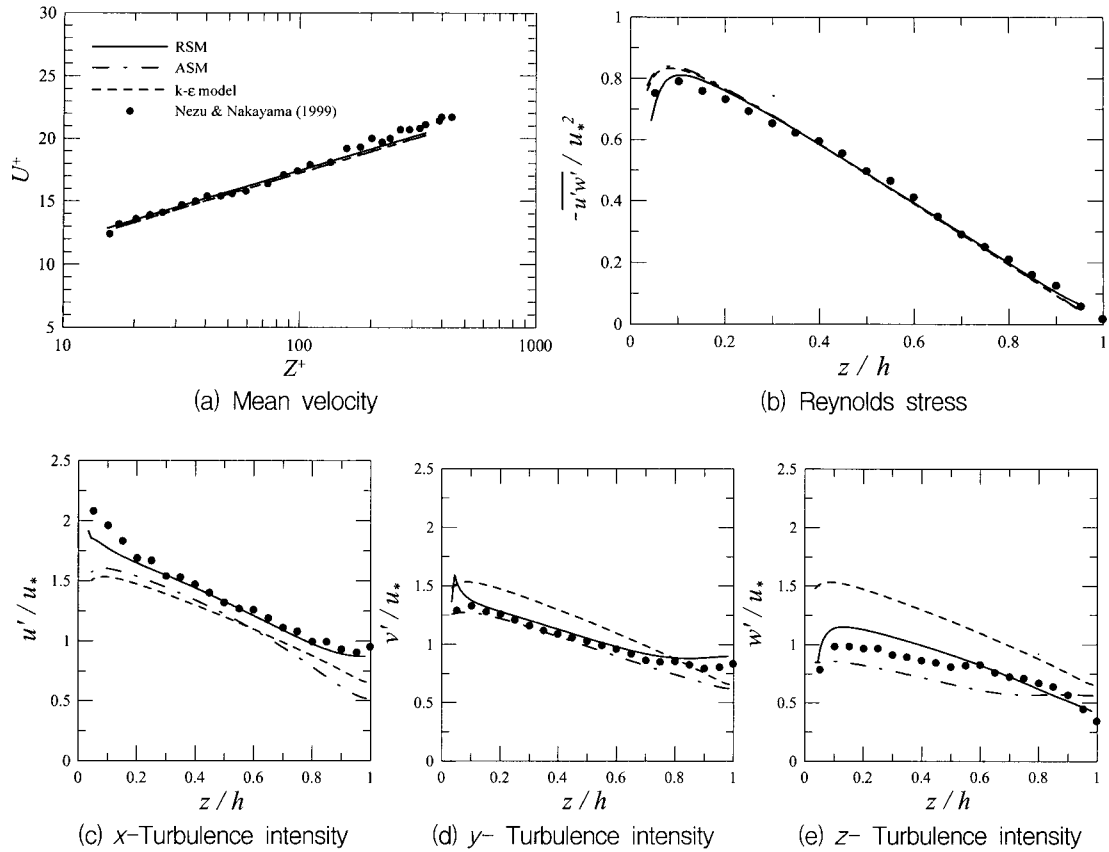


Fig. 2. Mean Velocity and Turbulence Structures in Plain Open-Channel Flows

Figs. 2(c)–2(e)는 세 방향으로의 난류강도 분포를 보여준다. 그림을 살펴보면 k-ε 모형은 등방성 난류모형이기 때문에 각 방향으로의 난류강도가 모두 동일한 것을 볼 수 있다. 또한 ASM에 의해 계산된 난류강도를 살펴보면, 중간영역(intermediate region)에서는 실험결과와 비교적 잘 일치하지만 바닥 및 자유수면 근처에서는 잘 일치하지 않는 것으로 나타났다. 즉, ASM은 비등방성 난류모형이지만 바닥 및 자유수면 경계에서 난류의 감쇠효과를 모의할 수 없는 것을 확인할 수 있다. 반면에 RSM은 세 방향으로의 난류강도가 실험결과와 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

## 5.2 침수식생된 개수로 흐름

등방성 및 비등방성 난류모형을 이용하여 침수식생 조건의 개수로 흐름에서의 평균유속과 난류구조를 수치모의 하고, 계산 결과를 Lopez and Garcia(1997)의 실험결과와 비교하였다. Lopez and Garcia(1997)는 수심( $h$ ) 0.335 m, 바닥경사( $S_0$ ) 0.0036인 개수로에서 ADV를 이용하여 실내실험을 수행하였다. 식생 조건은 곧은 식생이며, 식생밀도( $a$ )는  $1.09 \text{ m}^{-1}$ , 식생높이( $h_p$ ) 0.1175 m로서 침수비( $h/h_p$ )는 2.85이다. 또한 수치모의에서 사용

된 항력계수( $C_D$ )는 Dunn (1996)이 제시한 다음과 같은 실험식을 적용하였다.

$$\frac{C_D}{C_{D,A}} = 0.74 + 3.51\left(\frac{z}{h_p}\right) - 6.41\left(\frac{z}{h_p}\right)^2 + 2.72\left(\frac{z}{h_p}\right)^3 \quad (19)$$

여기서  $\overline{C_{D,A}}$ 는 수심평균된 항력계수로서 Dunn(1996)은 실내 실험을 통하여  $\overline{C_{D,A}} = 1.13$ 을 제시하였다.

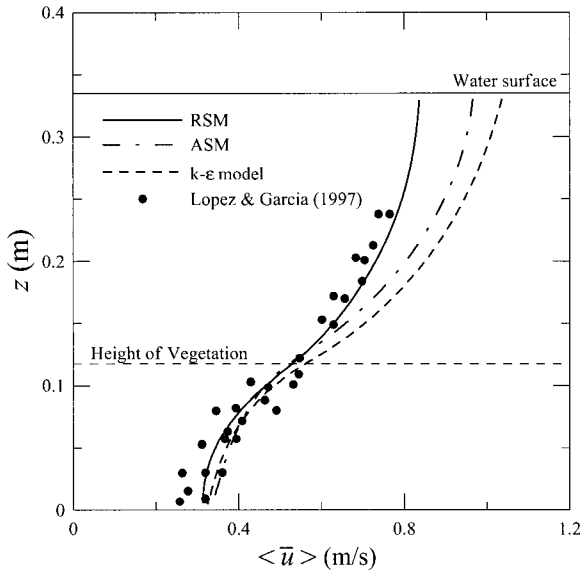
Fig. 3(a)는 식생된 개수로에서 평균유속의 수직분포를 보여준다. Fig. 3(a)를 살펴보면, 식생높이보다 높은 구간에서는 일반개수로의 유속분포와 비슷한 대수 분포를 보이나, 식생높이 근처에서 속도경사가 커지며 식생높이보다 낮은 구간에서는 식생에 의한 항력에 의해 평균유속이 감소되는 것을 볼 수 있다. 또한 식생높이보다 낮은 구간에서는 k-ε 모형과 ASM, RSM에 의한 계산결과가 실험결과와 모두 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 식생높이 보다 높은 구간에서는 RSM에 의한 유속분포가 실험결과와 가장 잘 일치하는 반면, 등방성 난류모형인 k-ε 모형은 평균유속을 과대 산정(약 16%)하고 ASM은 두 모형 사이에 위치하는 것을 볼 수 있다. 이는 식생높이 부근과 자유수면에서 난류의

비등방성이 강하게 발생하기 때문인 것으로 판단되며, 침수 식생 개수로 흐름에서의 난류의 비등방성은 Fig. 4에서 언급하였다.

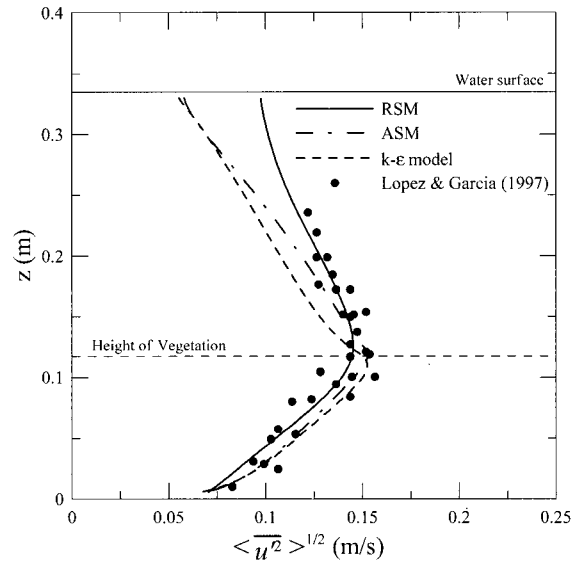
Fig. 3(b)은 식생된 개수로에서 주흐름방향 난류강도의 수직분포를 보여준다. 그림에서 난류강도의 분포는 바닥에서 증가하여 식생높이 근처에서 최대가 되고 다시 수면으로 갈수록 감소함을 알 수 있다. 수치모의 결과를 살펴보면 식생높이 아래 구간에서는 세 가지 난류 모형에 의해 계산된 난류강도 분포가 모두 실험과 잘

일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 식생높이 보다 높은 구간에서는 RSM이 실험결과와 가장 잘 일치하고, k-ε 모형은 다소 과소산정(약 10%)하는 것으로 나타났다. 특히, 자유수면 근처로 갈수록 등방성 모형과 RSM에 의한 난류강도 차이가 크게 발생하는 것을 볼 수 있다.

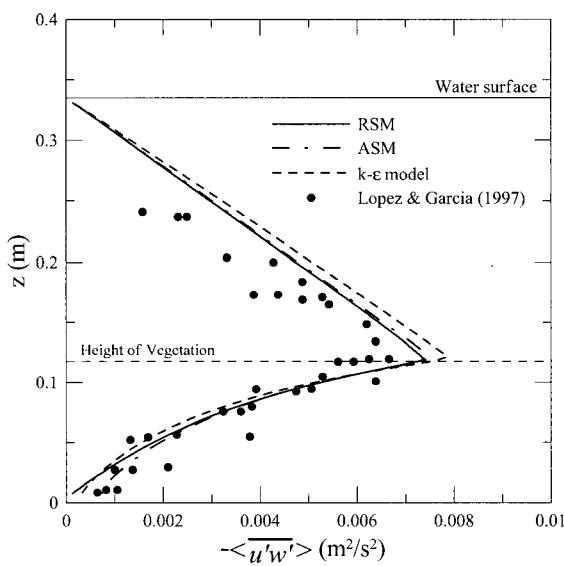
식생된 개수로에서 레이놀즈응력의 수직분포를 Fig. 3(c)에 나타내었다. Fig. 3(c)에서 레이놀즈응력의 분포는 난류강도와 비슷하게 바닥에서 증가하여 식생높이 부근에서 최대가 되고 수면에서는 영이 됨을 알 수 있다.



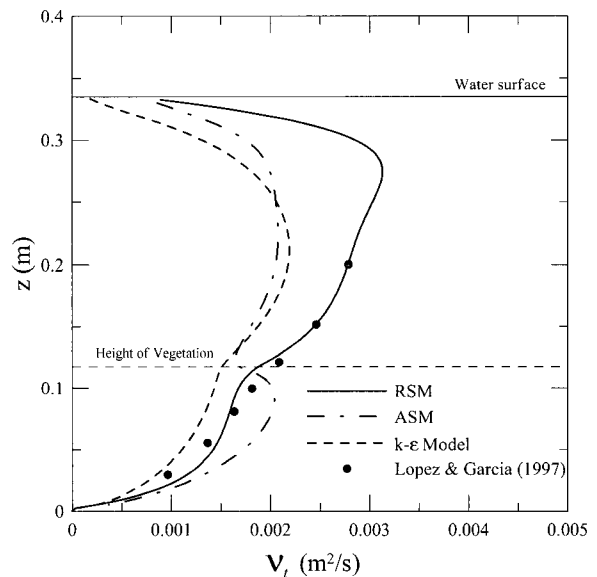
(a) Mean velocity



(b) x-Turbulence intensity



(c) Reynolds stress



(d) Eddy viscosity

Fig. 3. Mean Velocity and Turbulence Structures in Open-Channel Flows with Submerged Vegetation

식생높이 보다 낮은 구간에서는 수치모의에 의한 결과와 실험결과가 서로 잘 일치하지만 식생높이보다 높은 구간에서는 수치모의에 의한 결과가 실험결과 보다 다소 크게 나타난다. 식생높이보다 높은 구간에서 수치모의 결과와 실험결과의 차이를 살펴보면  $k-\epsilon$  모형보다는 RSM에 의한 결과가 실험결과와 좀더 잘 일치함을 볼 수 있다.

Fig. 3(d)는 난류동점성계수의 수직분포이다. Fig. 3(d)를 살펴보면  $k-\epsilon$  모형에 의한 계산결과는 식생높이 부근에서 극부적인 감소를 보이거나 전반적으로 포물선형태를 보이고 있음을 볼 수 있다. 그러나 비등방성 모형인 ASM과 RSM의 경우 식생높이 보다 높은 구간과 낮은 구간에서의 분포형태가 상이하게 다른 형태를 이루고 있음을 확인할 수 있다. RSM에 의한 난류동점성계수의 분포는 식생높이 보다 높은 구간에서 가장 크게 분포하고 있으며, 식생높이 보다 낮은 구간에서는 균일한 분포를 이루다가 바닥으로 갈수록 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 ASM에 의해 계산된 난류동점성계수의 분포는 식생높이 보다 높은 구간에서는  $k-\epsilon$  모형과 비슷한 형태를 이루고 있으며 식생높이 보다 낮은 구간에서는 세 모형 중 가장 크게 분포하고 있음을 볼 수 있다. 계산된 난류동점성계수 분포를 실험결과와 비교해 보면, 식생높이 보다 높은 구간에서는 RSM이 가장 잘 일치하고,  $k-\epsilon$  모형과 ASM은 과소 산정하는 것으로 나타났다. 또한 식생높이 보다 낮은 구간에서는 ASM은 실험결과 보다 과대산정하고,  $k-\epsilon$  모형은 과소 산정하는 것을 볼 수 있다. 특히,  $k-\epsilon$  모형은 RSM에 비해 약 30% 과소 산정하는 것으로 나타났다. 따라서 난류동점성계수는 부유사 농도와 매우 밀접한 관계가 있기 때문에 등방성 난류모형인  $k-\epsilon$  모형으로 부유사 농도분포를 계산할 경우 부유사량을 과소 산정할 것으로 예상된다.

Fig. 4는 침수식생된 개수로 흐름에서 RSM에 의해 계산된 세 방향으로의 난류강도 분포를 보여준다. 앞의 Fig. 2에서 언급한 바와 같이 식생이 없는 일반 개수로 흐름에서는 바닥과 자유수면 근처에서 난류의 비등방성이 강하게 발생된다. 그러나 Fig. 4를 살펴보면, 침수식생된 개수로 흐름의 경우 바닥 근처에서는 난류의 비등방성이 약화되는 반면, 식생높이 근처에서 난류의 비등방성이 강하게 발생된다. 또한 자유수면 근처에서는 난류의 감쇠효과에 의해 수직방향으로의 난류강도가 더욱 감소되는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 식생높이 보다 높은 구간에서 강하게 발생되는 난류의 비등방성은 Fig. 3에서 살펴본 바와 같이 평균유속 및 난류량 분포에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

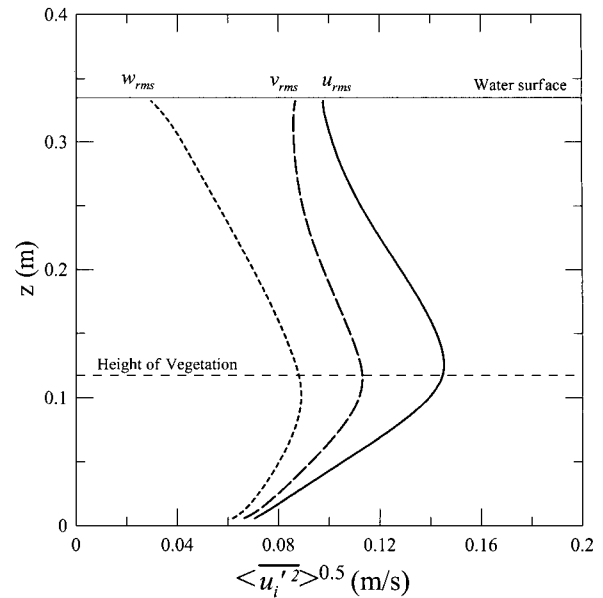


Fig. 4. Turbulence Anisotropy Profiles of Open-Channel Flows with Submerged Vegetation

### 5.3 정수식생된 개수로 흐름

세 가지의 난류모형을 이용하여 정수식생 조건을 갖는 개수로 흐름을 수치모의 하고, 계산 결과를 Nepf and Vivoni(2000)의 실험결과와 비교하였다. Nepf and Vivoni(2000)는 수심( $h$ ) 0.16 m를 갖는 개수로에서 LDV와 ADV를 이용하여 실내 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 모형 식생의 개략도와 식생 밀도 및 항력계수를 Fig. 5에 나타냈다. 식생조건은 유연한 식생이고, 식생밀도는  $1.62 \text{ m}^{-1} - 5.49 \text{ m}^{-1}$ , 항력계수는 바닥으로부터 급격히 감소하다가  $z/h_p > 0.2$ 인 구간에서 거의 일정한 분포를 나타내며, 수심평균된 항력계수의 값은 1.12이다.

Fig. 6(a)는 정수식생 개수로 흐름에서의 평균유속 분포도이다. Fig. 6(a)를 살펴보면, 평균유속 분포는 바닥에서 급격히 증가하였다가 자유수면을 향하여 서서히 감소하고 수면근처에서 다시 증가하는 것으로 나타났다. 또한  $z/h < 0.2$ 인 바닥 근처에서는 RSM이 실험결과와 가장 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 반면에  $z/h > 0.2$ 인 구간에서는 등방성 및 비등방성 난류모형에 의한 평균유속 분포가 거의 동일하며, 실험 결과와 잘 일치한다. 이는 다음에 언급할 레이놀즈응력 분포(Fig. 6(c))를 통해 설명될 수 있다. 즉, 정수식생에서는 수직방향으로의 운동량 전달이 매우 작으므로 레이놀즈응력은  $\langle \overline{u'w'} \rangle \approx 0$ 와 같다. 또한 운동량방정식 Eq. (1)에서 흐름이 정상상태이고 유체점성을 무시할 경우 평균유속은  $\langle \overline{u} \rangle^2 = 2gS_0 / (C_b a)$ 가 된다. 따라서 정수식생 조건의 개수



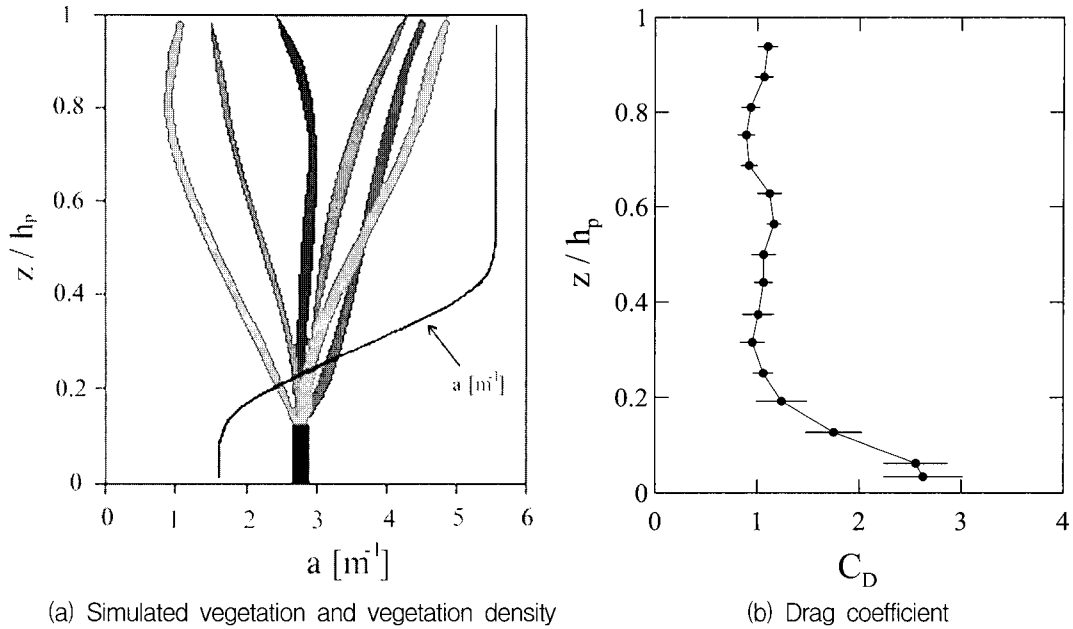
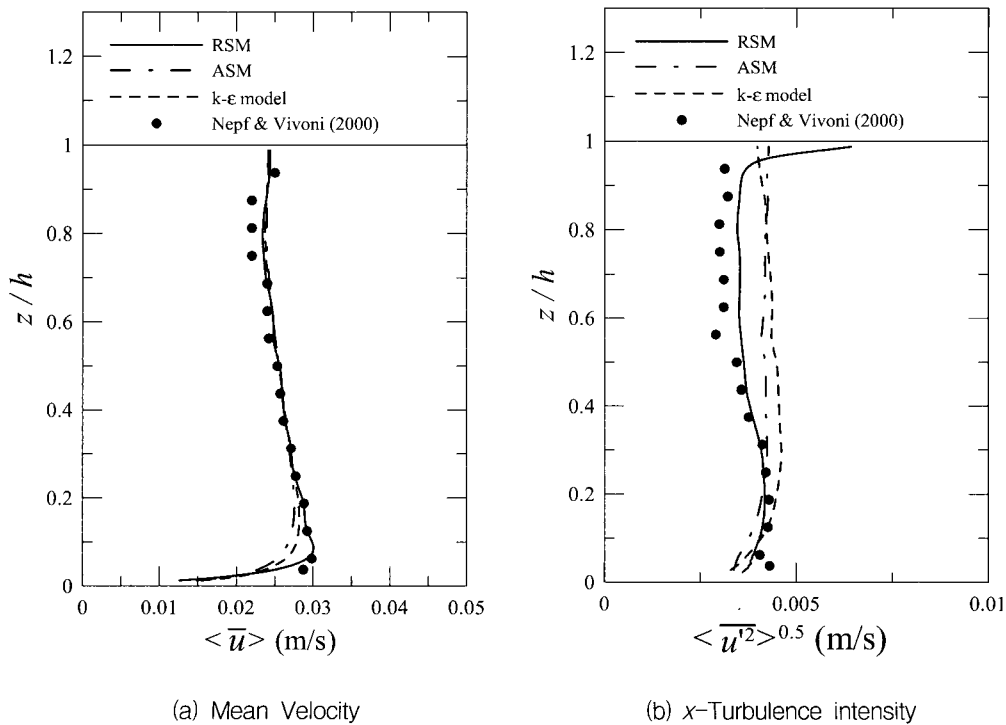


Fig. 5. Schematic View of Emergent Vegetation and Drag Coefficient Profile (Nepf and Vivoni, 2000)

로 흐름에서의 평균유속 분포는 항력계수( $C_D$ )와 식생밀도( $a$ )의 수직 구조에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

Fig. 6(b)는 주흐름방향 난류강도의 수직분포를 보여준다. Fig. 6(b)를 살펴보면 RSM에 의한 난류강도가 실험결과와 매우 잘 일치하는 반면에 다른 두 모형에 의한 결과는 과대 산정하는 것으로 나타났다. Fig. 6(c)는 레이놀즈응력 분포도이다. Fig. 6(c)를 살펴보면, 정

수식생 조건을 갖는 개수로 흐름에서의 레이놀즈응력은 전 수심에 걸쳐 거의 영의 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 또한 모든 난류모형이 이를 잘 모의 하는 것으로 나타났다. Fig. 6(d)는 난류운동에너지의 생성과 소멸을 보여준다. 그림에서  $P_s$ 와  $P_w$ 는 각각 다음과 같이 전단 및 후류에 의한 난류운동에너지 생성을 나타낸다.



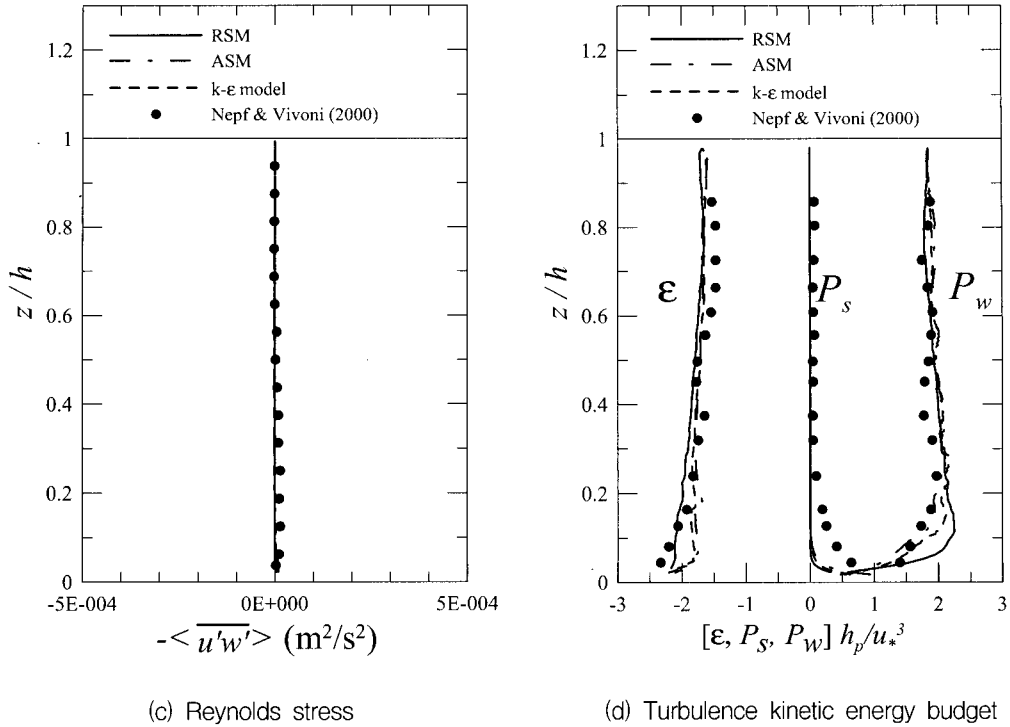


Fig. 6. Mean Velocity and Turbulence Structures in Open-Channel Flows with Emergent Vegetation

$$P_s = -\langle u'w' \rangle \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z}; \quad P_w = \frac{1}{2} C_D \rho \langle u \rangle^3 \quad (20a,b)$$

Fig. 6(d)를 살펴보면 등방성 및 비등방성 난류모형에 의한 예측 결과가 전반적으로 실험 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 난류운동에너지 생성은 수심 전반에 걸쳐 후류에 의해 발생하는  $P_w$ 가 지배적이며, 전단에 의한  $P_s$ 는 바닥 근처를 제외하고는 거의 영의 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 전체 수심에 걸쳐 생성과 소멸이 거의 일정한 값을 나타내어 에너지 균형 상태를 이루고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 정수식생 개수로 흐름에서 난류의 비등방성을 보여준다. 그림을 살펴보면 RSM에 의해 계산된 세 방향으로의 난류강도가 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 침수식생 개수로에서의 비등방성과는 달리 정수식생 개수로 흐름에서는 주흐름방향 및 횡방향으로의 난류강도 차이가 상대적으로 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 자유수면을 제외한 모든 영역에서 거의 동일한 수준의 비등방성을 갖으며, 자유수면 근처에서는 난류의 감쇠효과에 의해 수직방향으로의 난류강도는 감소하고 주흐름방향 및 횡방향으로의 난류강도는 증가하는 것을 볼 수 있다.

## 5. 부유사 이동

난류흐름에서 일정한 입자크기를 갖는 부유사의 질량 보존식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \langle \tilde{c} \rangle}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (w_s \langle \tilde{c} \rangle - \langle w \tilde{c} \rangle) \quad (21)$$

여기서  $\langle \tilde{c} \rangle$ 는 시간 및 공간평균된 부유사 농도,  $\langle w \tilde{c} \rangle$ 는 수직방향으로의 레이놀즈 흐름률,  $w_s$ 는 유사입자의 침강속도로서 본 연구에서는 Garcia(1999) 공식을 이용하였다. 또한 Eq. (21)에서  $\langle w \tilde{c} \rangle$ 는 다음과 같은 난류확산개념(eddy diffusivity concept)을 이용하여 구할 수 있다.

$$-\langle w \tilde{c} \rangle = \frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial \langle \tilde{c} \rangle}{\partial z} \quad (22)$$

여기서  $\sigma_c$ 는 Prandtl-Schmit 수이다. 부유사 보존방정식인 Eq. (21)을 수치모의 하기 위한 부유사 농도 경계 조건은 바닥 근처에서 유사입자의 침강과 수중으로 부상되는 비율이 평형을 이룬다는 가정하에 Garcia and Parker(1991)가 제시한 다음의 식을 바닥 경계조건으로 이용하였다.

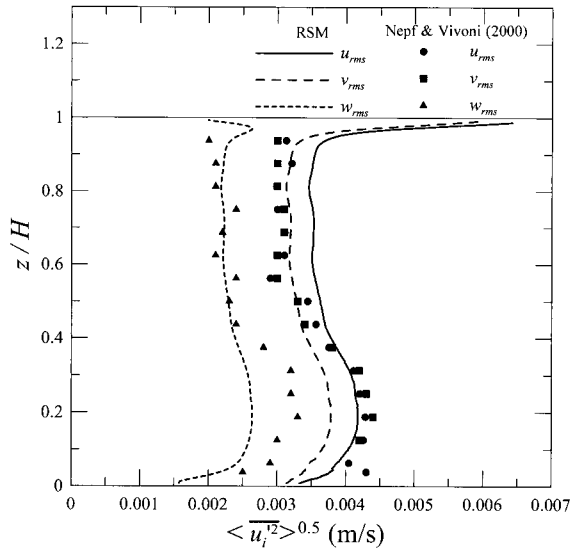


Fig. 7. Turbulence Anisotropy of Open-Channel Flows with Emergent Vegetation

$$\langle \bar{c} \rangle = \frac{AZ_u^5}{1 + AZ_u^5/0.3} \quad (23)$$

여기서  $A = 1.3 \times 10^{-7}$ 이고  $Z_u = u_* / w_* Re_p^{0.6}$ 이다. 또한  $Re_p$ 는 입자레이놀즈수로서  $Re_p = D_s \sqrt{gRD_s} / \nu$ 이고  $D_s$ 는 입자크기,  $R$ 은 입자의 수중단위질량이다.

Fig. 8은 무차원 식생밀도( $Ha$ )에 대한 침수식생 개수로 흐름에서의 부유사량 변화를 보여준다. 침수식생된 개수로 흐름에서 부유사량에 대한 난류의 비등방성 효과를 검토하기 위해 RSM과 k- $\epsilon$  모형을 이용하여 수치모의 하였다. Fig. 8의 세로축은 비교를 위하여 일반 개수로에서의 부유사량( $q_s$ )과 식생된 개수로에서의 부유사량( $q_{sv}$ )에 대한 비를 도시하였다. 수치모의에서 부유사량은 평균유속과 평균농도의 곱을 수직적분하여 구할 수 있다. 계산에 사용된 유량은  $q_w = 1.2 \text{ m}^2/\text{s}$ , 식생높이  $h_p = 0.12 \text{ m}$ , 입자크기  $D_s = 100 \mu$ 이다. 그림을 살펴보면 무차원 식생밀도가 증가할 수록 부유사량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 RSM에 비하여 k- $\epsilon$  모형이 부유사량을 과소 산정하는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 정수식생된 개수로 흐름에서 RSM과 k- $\epsilon$  모형에 의해 계산된 부유사량의 비교를 보여준다. 본 연구에서는 계산결과의 비교를 위하여 다음과 같이 Tollner et al(1982)이 제시한 실험식을 이용하였다.

$$\Psi = 0.52 \Phi^{-0.153} \quad (24)$$

Tollner et al (1982)은 폭 0.13 m, 길이 2.1 m의 수로

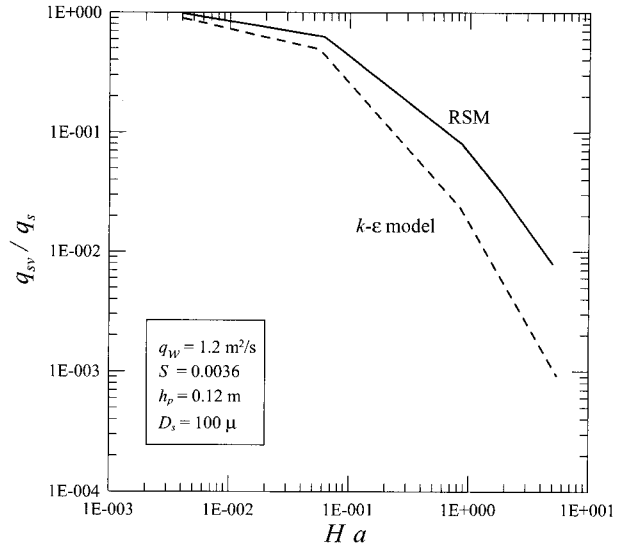


Fig. 8. Change of Suspended Sediment Load with Vegetation density

에 실린더 모양의 끈은 정수식생이 식재된 개수로 흐름에서의 부유사량을 측정하였다. Eq. (24)에서  $\Psi (= RD_s/R_s S_0)$ 는 전단강도 매개변수(shear intensity parameter),  $\Phi (= R_s CU / \sqrt{gRD_s})$ 는 부유사 수송에 대한 매개변수(suspended sediment transport parameter),  $R_s (= s_p h / (s_p + 2h))$ 는 식생간격과 수심과의 비,  $s_p$ 는 식생간격,  $C$ 와  $U$ 는 각각 수심적분된 부유사 농도와 평균유속이다. Fig. 9에서 수치모의 조건은 수심  $h = 0.02 - 0.05 \text{ m}$ , 바닥경사  $S_0 = 0.08$ , 입자크기  $D_s = 80 - 200 \mu$ , 식생간격  $s_p = 9.45 \text{ mm} - 15.83 \text{ mm}$ 으로서 총 14가지 경우의 계산 결과를 비교하였다. 이와 같은 계산 조건은 Tollner et al (1982)의 실험 범위에 포함된다. 또한 그림에서 45°선은 수치모의와 실험결과가 완전히 일치하는 것을 의미한다. Fig. 9를 살펴보면 RSM에 의해 계산된 부유사량은 Tollner et al (1982)의 실험식과 매우 잘 일치하는 반면에 k- $\epsilon$  모형에 의한 결과는 실험식보다 과소 산정하는 것을 볼 수 있다. 또한 실험식 Eq. (24)와 각 모형에 의해 계산된  $\Phi$ 와의 차이를 산정하기 위하여 다음과 같은 불일치비(discrepancy ratio)를 계산하였다.

$$M_e = 10^b; \quad b = \frac{1}{N} \sum \log \left( \frac{\Phi_{predicted}}{\Phi_{measured}} \right) \quad (25)$$

여기서  $N$ 은 데이터 개수이고,  $M_e$ 가 1.0이면 실험식과 수치모의 결과가 완전 일치하는 것을 의미한다. RSM과 k- $\epsilon$  모형에 의해 계산된 부유사량의 불일치비를 산정

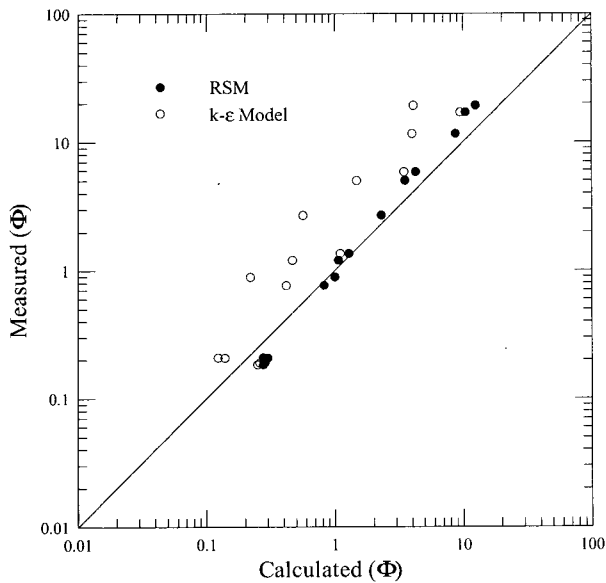


Fig. 9. Comparison between Calculated and Measured Suspended Sediment Load

한 결과 RSM은  $M_e = 0.97$ , k- $\epsilon$  모형에서는  $M_e = 0.58$ 로 나타났다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 식생된 개수로 흐름에서 난류의 비등방성이 흐름구조 및 유사량에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 위하여 비등방성 난류모형인 RSM을 이용하여 식생된 개수로 흐름을 수치모의 하였다. 개수로 흐름에 대한 일차원 수치모형을 구성하여 식생이 없는 일반 개수로 흐름과 침수 및 정수식생된 개수로 흐름을 수치모의 하였다. 각각의 개수로 흐름에서의 평균유속 및 난류량을 계산하고 기존의 실험결과와 비교하였다. 또한 식생된 개수로 흐름에서 난류의 비등방성을 살펴보기 위하여 RSM에 의한 계산결과를 등방성 난류모형인 k- $\epsilon$  모형 및 레이놀즈응력의 대수식을 해석하여 난류의 비등방성 효과를 고려하는 ASM과 비교하였다.

식생이 없는 일반 개수로 흐름의 경우 바닥 및 자유수면 근처에서 난류의 감쇠효과에 의해 비등방성이 강하게 발생되고 중간영역에서는 비등방성이 약화되는 것으로 나타났다. 또한 정수식생된 개수로 흐름에서는 자유수면 근처를 제외한 전 구간에 걸쳐 동일한 수준의 비등방성이 발생하는 것으로 나타났다. 일반 개수로 흐름과 정수식생된 개수로 흐름에서의 평균유속과 레이놀즈응력을 계산한 결과 등방성 및 비등방성 모형 모두 실험결과와 매우 잘 일치하였으며, 난류의 비등방성에 대한 영향은 매우 작은 것으로 나타났다.

침수식생된 개수로 흐름을 수치모의 한 결과 식생높

이 부근에서 난류의 비등방성이 가장 강하게 발생하는 것으로 나타났다. 계산된 평균유속 및 난류강도는 RSM이 수치실험 결과와 가장 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 등방성 모형인 k- $\epsilon$  모형은 식생높이 보다 높은 영역에서 평균유속과 난류강도를 실험결과 보다 각각 과대 및 과소산정 하였다. 또한 난류동점성계수의 분포를 수치모의 한 결과 등방성 모형은 식생높이 부근에서 국부적인 감소를 보이는 포물선 형태를 이루고 있으나, 비등방성 모형은 식생높이 보다 높은 구간과 낮은 구간에서 서로 다른 분포형태를 이루고 있음을 확인하였다.

이상과 같은 연구결과 등방성 모형 보다는 비등방성 모형에 의한 모의 결과가 실험과 더 잘 일치하였으나 이러한 사항으로부터 일반적인 결론을 이끌어내기 위해서는 더 많은 실험 결과와의 비교가 필요할 것으로 보인다. 다만 등방성 및 비등방성 모형에 의한 모의 결과는 평균 유속 및 난류량 분포에서 약간의 차이를 보이지만 오염물질이나 유사량 산정에는 심각한 영향을 보이는 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

- 강형식, 최성욱 (2002). "개수로 흐름에서 레이놀즈응력 모형의 비교." *대한토목학회논문집*, 22(1-B), 21-32.
- Burke, R.W. and Stolzenbach, K.D. (1983). "Free surface flow through salt marsh grass." *MIT-Sea Grant Report MITSG 83-16*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
- Cokljat, D. and Younis, B.A. (1995a). "Second-order closure study of open-channel flows." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 121(2), 94-107.
- Demuran, A.O. and Rodi, W. (1984). "Calculation of turbulence driven secondary motion on non circular ducts." *Journal of Fluid Mechanics*, 140, 189-222.
- 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.
- Garcia, M. (1999). "Sedimentation and erosion hydraulics." Mays, L.W. (Ed.), *Hydraulic Design Handbook*, McGraw-Hill, 6.1-6.113.
- Garcia, M. and Parker, G. (1991). "Entrainment of bed sediment into suspension." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 117(4), 414-435.
- Gibson, M.M. and Launder, B.E. (1978). "Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric

- boundary layer." *Journal of Fluid Mechanics*, 86, 491-511.
- Hanjalic, K. and Launder, B.E. (1972). "A Reynolds stress model of turbulence and its application to thin shear flows." *Journal of Fluid Mechanics*, 52, 609-638.
- Launder, B.E., Reece, G.J., and Rodi, W. (1975). "Progress in the development of Reynolds stress turbulence closure." *Journal of Fluid Mechanics*, 63(3), 537-566.
- Lopez, F. and Garcia, M. (1997). "Open-channel flow through simulated vegetation: Turbulence modeling and sediment transport." *Wetlands Res. Program Tech. Rep. WRP-CP-10*, Waterw. Exp. Stn., Vicksburg, MS.
- Lopez, F. and Garcia, M. (1998). "Open-channel flow through simulated vegetation: Suspended sediment transport modeling." *Water Resource Research*, AGU, 34(9), 2341-2352.
- Mellor, G.L. and Herring, H.J. (1973). "A survey of mean turbulent field closure." *AIAA Journal*, 11, 590-599.
- Naot, D. and Rodi, W. (1982). "Calculation of secondary currents in channel flow." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 108(HY8), 948-968.
- Neary, V.S. (2003). "Numerical solution of fully developed flow with vegetative resistance." *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 129(5), 558-563.
- Nepf, H.M. (1999). "Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation." *Water Resources Research*, AGU, 35(2), 479-489.
- Nepf, H.M. and Vivoni, E.R. (2000). "Flow structure in depth-limited, vegetated flow." *Journal of Geophysical Research*, AGU, 105(12), 547-557.
- Nezu, I. and Nakayama, T. (1999). "Numerical calculation of steep open-channel flows by considering effects of surface wave fluctuations." *International Conference of WEESH*, Seoul, Korea.
- Rodi, W. (1976). "A new algebraic relation of calculating the Reynolds stresses." *ZAMM*, 56, 219-221.
- 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 Hydroscience and Hydraulic Engineering*, JSCE, 11(2), 57-67.
- Shir, C.C. (1973). "A preliminary numerical study of atmospheric turbulent flow in the idealized planetary boundary layer." *Journal of Atmospheric Science*, 30, 1327-1339.
- Speziale, C.G., Sarkar, S., and Gatski, T. (1991). "Modeling the pressure strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach." *Journal of Fluid Mechanics*, 227, 245-272.
- Tollner, E.W., Barfield, B.J., and Hayes, J.C. (1982). "Sedimentology of erect vertical filters." *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, 108(HY12), 1518-1531.
- Ward, L., Kemp, W., and Boyton, W. (1984). "The influence of waves and seagrass communities on suspended particulate in an estuarine embayment." *Marine Geology*, 59, 85-103.

(논문번호:05-32/접수:2005.02.18/심사완료:2005.08.25)