

# 식생된 개수로에서 난류 구조와 부유사 이동 현상의 수치해석

## Numerical Investigation of Turbulence Structure and Suspended Sediment Transport in Vegetated Open-Channel Flows

강 형 식\* / 최 성 욱\*\*

Kang, Hyeongsik / Choi, Sung-Uk

### Abstract

Turbulence structure and suspended sediment transport capacity in vegetated open-channel flows are investigated numerically in the present paper. The  $k-\epsilon$  model is employed for the turbulence closure. Mean velocity and turbulence characteristics including turbulence intensity, Reynolds stress, and production and dissipation of turbulence kinetic energy are evaluated and compared with measurement data available in the literature. The numerical results show that mean velocity is diminished due to the drag provided by vegetation, which results in the reduction of turbulence intensity and Reynolds stress. For submerged vegetation, the shear at the top of vegetation dominates turbulence production, and the turbulence production within vegetation is characterized by wakes. For emergent condition, it is observed that the turbulence generation is dominated by wakes within vegetation. In general, simulated profiles compares favorably to measured data. Computed values of eddy viscosity are used to solve the conservation equation for suspended sediment, yielding sediment concentration more uniform over the depth compared with the one in the plain channel. The simulation reveals that the suspended load decreases as the vegetation density increases and the suspended load increases as the particle diameter decreases for the same vegetation density.

*keywords* : vegetated open-channel flows, turbulence structure, suspended sediment transport,  $k-\epsilon$  turbulence model

### 요 지

본 연구에서는 식생된 개수로에서의 난류 구조와 부유사 이동을 수치모의하였다. 난류폐합식으로는  $k-\epsilon$  난류모형을 사용하였다. 수치모의를 통해 평균유속, 난류강도, 레이놀즈 응력, 난류에너지 생성 및 소멸의 분포를 계산하였으며, 기존의 실험 결과와 비교하였다. 식생에 의한 항력으로 인하여 평균유속이 전반적으로 감소되었으며, 이에 따라 난류강도와 레이놀즈 응력의 분포 역시 약화되었다. 침수식생의 경우, 식생높이보다 높은 구간에서는 전단에 의한 난류에너지 생성이 지배적이며, 식생높이보다 낮은 구간에서는 후류에 의한 난류에너지 생성이 지배적임을 확인하였다. 또한 정수식생의 경우, 전체 수심에 걸쳐 후류에 의한 난류에너지 생성이 지배적으로 발생하였다. 대체적으로 수치모의에 의한 결과가 실험값과 유사한 양상을 보이는 것이 확인되었다. 수치모형으로부터 계산된 난류동점성계수 분포를 이용하여 부유사 보존방정식을 수치해석하였다. 식생된 개수로에서의 부유사 농도는 일반 개수로에 비해 전 수심에 걸쳐 균일하게 분포하였다. 또한 식생밀도가 증가할수록 부유사량은 감소하며, 동일한 식생밀도에 대해서는 입자의 크기가 작을수록 부유사량이 증가함을 확인하였다.

**핵심용어** : 식생된 개수로 흐름, 난류구조, 부유사이동,  $k-\epsilon$  난류모형

\* 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정

Graduate Student, Department of Civil Engineering, Graduate School, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea  
(E-mail : kanghs@yonsei.ac.kr)

\*\* 연세대학교 사회환경·건축공학부 조교수

Assistant Professor, School of Civil, Urban, and Architectural Engineering, Graduate School, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

## 1. 서 론

하천이란 하도내를 흐르고 있는 유수와 유수를 떠받치고 있는 하천구역 내의 하신(河身), 그리고 이들 가운데 살아 숨쉬고 있는 어족이나 식물 생태계 등을 총칭하는 것을 말한다(이원환, 1997). 따라서 위의 하천을 이루고 있는 3가지 요소 중 어느 하나라도 결함이 있으면 하천으로서의 제 기능을 하지 못한다고 할 수 있다. 과거 하천에 대한 관리는 홍수시 통수능 확보에만 관심이 집중됨에 따라 하천수의 수질문제와 하천변 생태계 문제에 대한 관심은 상대적으로 미흡하였다. 또한 1960년대에 들어 급속한 산업화와 도시화로 인하여 하천수질 오염은 지속적으로 악화되어 왔으며, 하천 치수 목적만을 강조한 결과 인공적이고 획일적인 하천 개수와 도로확장의 방편으로 도시 하천의 복개가 보편화되었다. 그 결과 많은 하천이 환경기능을 상실하게 되었다. 하지만 최근에 생활수준의 향상으로 인해 자연환경에 대한 관심이 높아지면서 하천변의 자연 생태계 보전과 하천 수질오염 방지에 대한 노력이 점차 커지고 있다. 1995년 말부터는 G-7 환경기술 개발의 일환으로 자연형 하천공법을 도입하여 기존의 콘크리트로 이루어진 저수호안을 생물재료를 이용하여 대체하고 직선화된 저수로를 곡선화 하여 자연에 가깝게 복원시키는 노력들이 시도되고 있다(우효섭 등, 1999). 그러나 자연형 하천개발에 대한 수리학적 연구성과는 아직까지 미흡한 실정이다.

미국의 경우 하천내 부유사 오염 방지를 위한 법안이 개정되면서 부유사로 인한 하천 오염을 방지하려는 연구가 활발히 이루어져 왔다. 이러한 연구를 통해 하천내 식생은 필터와 같은 역할을 함으로써 부유사로 인한 하천오염을 방지하는데 효과적이라는 연구결과가 발표되었다(Hayes 등, 1978). 또한 하천내 식생은 흐름의 유속을 감소시키고, 토사의 침식을 억제하며, 유사의 퇴적을 유발시키는 역할을 한다. 실제로 Demissie(1990)는 미 중서부의 Cache 강에서 현장 측정한 결과 식생의 영향으로 약 60-80%의 부유사 퇴적 효과가 증가한다고 보고하였다. 이와 같이 하천내 서식하는 식생이 오염물질의 확산을 억제시킨다는 연구결과는 최근 친환경적인 사회적 요구와 부합되는 것으로서 하천의 수질 오염을 방지하기 위해 인공적인 구조물을 설치하지 않고 자연적인 기법으로 방지할 수 있다는 것을 의미한다.

이상과 같이 하천내 부유사 수송에 대한 문제를 실

험이나 현장관측을 통해 예측하는 것은 그 자체로 의미가 있지만, 비경제적이며 많은 시간이 소모되고 다른 여러 분야로의 응용이 이루어지기 어려운 단점이 있다. 따라서 식생된 개수로에서 난류구조의 변화와 부유사 수송을 예측할 수 있는 수치해석에 의한 연구가 필요하다. 과거 식생에 대한 수리학적인 접근은 Manning 공식의 조도계수를 늘려줌으로써 흐름의 유속을 감소시키는 방법을 사용하여왔다. 식생된 개수로 흐름에 난류모형을 적용하기 시작한 것은 비교적 최근의 일이다. Burke와 Stolzenbach(1983)가 처음으로 2-방정식 모형을 식생이 있는 자유수면흐름에 적용하였으며, Naot 등(1996)은 응력대수식 모형을 사용하여 식생된 3차원 흐름을 해석한 바 있다. Lopez와 Garcia(1998)는 식생된 개수로에서의 부유사 문제를  $k-\epsilon$  난류모형을 사용하여 연구한 바 있다. 실험연구로는 Tollner 등(1982)이 식생된 개수로에서 유사퇴적에 대해 실험하였으며, Dunn(1996)은 휘어지지 않고 곧은 원통형 실린더 모양의 식생에 대한 항력계수를 산정하였다. Nepf와 Vivoni(1999)는 식생된 개수로에서 침수식생(沈水植生, submerged vegetation) 조건과 정수식생(挺水植生, emergent vegetation) 조건에 대한 난류구조를 연구하였으며, Nepf(1999)는 정수식생을 갖는 개수로에서 식생의 영향으로 인한 항력과 난류구조의 변화에 대해 연구하였다. 국내에서도 권기원과 최성욱(2000)은  $k-\epsilon$  난류모형을 이용하여 식생된 개수로에서의 난류구조를 수치모의 하였고, Choi(1999a)는 적분모형을 이용하여 식생된 개수로흐름의 배수곡선식을 제시하였다. 또한 Choi(1999b)는 주수로와 홍수터 사이에 질량 및 운동량을 교환할 수 있는 복합단면 개수로의 수학모형에 홍수터의 식생을 고려할 수 있는 새로운 수치모형을 개발하였다.

본 연구의 목적은  $k-\epsilon$  난류모형을 이용하여 식생된 개수로 흐름의 수직구조와 부유사 이동을 해석하는 것이다. 일반 개수로와 식생된 개수로에서 난류구조의 변화를 분석한 후 부유사 농도분포를 수치모의 하여, 식생된 개수로에서 부유사 이동 현상에 대한 식생의 역할을 파악하였다.

## 2. 지배방정식

개수로에서 주 흐름방향을  $x$ , 횡 방향을  $y$ , 바닥면에서 수직인 방향을  $z$ 로 정하였다. 하천의 바닥에 동일한 지름을 갖는 식생이  $x$ 와  $y$ 방향으로 등간격으로

배열되었고 레이놀즈 수가 충분히 큰 경우 Navier-Stokes 방정식을 시간평균하면 다음 식 (1)과 같은 운동량방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} \right) - f_x + g S_o \quad (1)$$

여기서  $u$ 는 시간평균된 흐름방향의 유속이며,  $\nu_{eff}$ 는 유효동점성계수,  $f_x$ 는 단위체적당 항력,  $g$ 는 중력가속도,  $S_o$ 는 바닥경사를 나타낸다. 식 (1)에서 유수로 인하여 식생에 작용하는 단위체적당 항력은 다음 식 (2)와 같다.

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

여기서  $C_D$ 는 항력계수이고  $a$ 는 식생의 밀도로서 아래 식 (3)과 같이 정의된다.

$$a = \frac{D}{A_h} = \frac{D}{l_x l_y} \quad (3)$$

여기서  $D$ 는 식생의 지름을 나타내며,  $A_h$ 는 식생간격에 의한 하상의 단위면적,  $l_x$ 와  $l_y$ 는 각각  $x$ 와  $y$  방향으로의 식생의 간격을 나타낸다. 식 (2)에서 항력계수  $C_D$ 는 상류단 식생에 의해 발생된 후류(wake)에 영향을 받으며, 식생 간격이 작을수록 하류단 식생의 항력계수는 더 작아진다(Nepf, 1999). 또한 Dunn (1996)은 휘어지지 않고 곧은 원통형모양의 식생에 대한 수리실험을 통해 항력계수는 깊이 방향에 따라 변하는 값이며, 식생높이의 1/3지점에서 최대값을 이루고, 항력계수의 평균값을  $C_D = 1.13 \pm 15\%$ 로 제시하였다. 본 수치모의에서는 이러한 항력계수의 특성을 반영하기 어려우므로 Dunn(1996)의 수리실험 결과에 의해  $C_D = 1.13$ 을 사용하였다. 식 (1)에서 유효동점성계수( $\nu_{eff}$ )는 동점성계수( $\nu$ )와 난류동점성계수( $\nu_t$ )의 합이며, 난류동점성계수는 다음 식 (4)와 같은 Prandtl-Kolmogorov 식으로부터 구할 수 있다.

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

여기서  $C_\mu$ 는 경험상수이다.

지배방정식의 폐합문제(closure problem)를 해결하기 위하여 2-방정식 난류모형인  $k-\epsilon$  모형을 사용하였다. 즉, 식 (4)를 이용하여 난류동점성계수를 산정하기 위해서 다음과 같은 난류운동에너지( $k$ )와 난류운동에너지 소산율( $\epsilon$ )의 수송방정식을 해석한다.

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

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

여기서  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$ ,  $C_{1\epsilon}$ 와  $C_{2\epsilon}$ 은 난류상수를 나타낸다. 모형에 사용된 난류상수는  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_{1\epsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\epsilon} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.00$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.30$ 를 사용하였으며, 이 값들은 Launder와 Spalding(1974)이 제시한 표준 값들이다.  $C_{fk}$ 와  $C_{f\epsilon}$ 은 각각  $k$ 와  $\epsilon$ 의 수송방정식에서 식생에 의한 영향을 조정하는 계수이다. Lopez와 Garcia(1997)는  $C_{fk}$ 의 값이 거의 1에 근접하며,  $C_{f\epsilon}$ 은 아래 식 (7)과 같은 관계가 있음을 제시하였다.

$$C_{f\epsilon} = \frac{C_{2\epsilon}}{C_{1\epsilon}} C_{fk} \quad (7)$$

모형에 적용된 항력조정계수는 식 (7)을 이용하여  $C_{fk} = 1.0$ 과  $C_{f\epsilon} = 1.33$ 을 사용하였다.

난류흐름에서 일정한 입자 크기와 밀도를 갖고 있는 부유사의 질량보존식은 아래 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (w_s c - \overline{w'c'}) \quad (8)$$

$\overline{w'c'}$ 은 수직방향으로의 레이놀즈 흐름률을 나타내며, 난류확산개념을 도입하면 식 (8)은 식 (9)와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( w_s c + \frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (9)$$

여기서  $c$ 는 시간평균된 부유사 농도,  $w_s$ 는 입자의 침강속도, 그리고  $\sigma_c$ 는 Prandtl-Schmit 수를 나타낸다. 본 연구에서는 PROBE(Svensson, 1998)를 사용하여 위의 지배방정식을 유한차적법에 의해 수치해석하였다.

### 3. 경계조건

난류 흐름에서 바닥 경계부근의 유동은 속도경사가 매우 크기 때문에 많은 격자점을 집중시켜야 하지만 전체 계산영역의 아주 작은 부분을 차지하는 벽면 부근에 많은 격자점을 배치하는 것은 비효율적이다. 또한 점성저층에서는 점성효과가 지배적이므로 레이놀즈 수가 큰 난류모형은 적용할 수 없다. 이러한 이유 때문에 일반성을 갖는 경험공식인 벽 법칙(law of the wall)이 주로 사용된다. 벽면부근을 점성저층, 완충층, 대수영역으로 구분되는 3층 벽 법칙이 좀 더 정확하지만, 본 연구에서는 계산상의 편의를 위하여 완충층을 생략하고 바닥면으로부터 무차원 거리  $z^+$  ( $\equiv u_*z/\nu$ ) = 11.5를 기준점으로 하여 점성저층과 대수영역으로 나눈 2층 벽 법칙을 사용하였다. 바닥면에서의 평균유속, 난류에너지, 그리고 난류에너지 소산율의 경계조건은 벽 함수(wall function)를 이용하였다.

부유사 보존방정식인 식 (9)를 수치모의 하기 위한 부유사 농도 경계조건은 바닥면 근처에서 유사입자의 침강과 수중으로 부상되는 비율이 평형을 이룬다는 가정 하에 Garcia와 Parker(1991)가 제시한 아래의 식 (10)을 경계조건으로 사용하였다.

$$c = \frac{AZ_u^5}{\left(1 + \frac{A}{0.3} Z_u^5\right)} \quad (10)$$

여기서  $Z_u = Re_p^{0.6} u_* / w_s$ 이고  $A = 1.3 \times 10^{-7}$ 이다. 또한  $Re_p$ 는 입자레이놀즈수로서 다음 식 (11)과 같이 정의된다.

$$Re_p = \frac{D_s \sqrt{gRD_s}}{\nu} \quad (11)$$

여기서  $D_s$ 는 유사 입자의 직경을 나타내고,  $R$ 은 입자의 수중단위질량을 나타낸다.

자유수면에서는 자유수면 부근에 바람 등의 영향으로 인한 전단층을 고려하기 위하여 자유수면을 움직이

는 벽으로 가정하는 벽 법칙을 적용하는 것이 적당하다. 그러나 벽 법칙의 직접적인 적용에는 한계가 있으므로 자유수면에서 난류의 특성길이를 감소시킴으로써 자유수면의 영향을 고려한다(Rodi, 1993). 이러한 자유수면의 영향을 고려하기 위해 Celik과 Rodi(1984)가 제안한 식 (12)를 난류에너지 소산율의 경계조건으로 사용하였다.

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\alpha H} \quad (12)$$

여기서  $H$ 는 수심,  $\alpha$ 는 경험적인 상수로 Hossain(1980)이 0.07로 제안하였다. 위의 식 (12)는 대칭평면 조건보다  $\epsilon$ 이 크게 되며, 자유수면 부근의 특성길이( $L$ )는  $L \propto k^{3/2} / \epsilon$ 의 비율로 제한 받게 된다. 또한 자유수면에서의 유속, 난류에너지 그리고 부유사 농도는 법선경사가 영이라는 대칭평면 조건을 사용하였다.

### 4. 난류구조

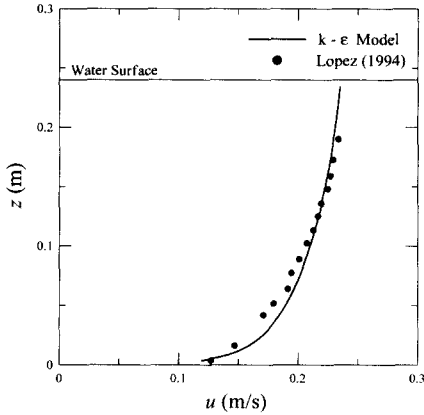
식생된 개수로에서의 부유사 이동을 해석하기에 앞서 식생이 개수로 흐름변화에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 해석이 선행되어야 한다. 수치모형이 식생이 없는 일반 개수로의 흐름을 적절히 모의하는지 살펴보기 위하여 Lopez(1994)의 실험결과 비교하였으며, 식생된 개수로 흐름의 경우는 Lopez(1997)와 Nepf와 Vivoni(1999)의 실험결과와 비교·검토하였다.

#### 4.1 일반 개수로

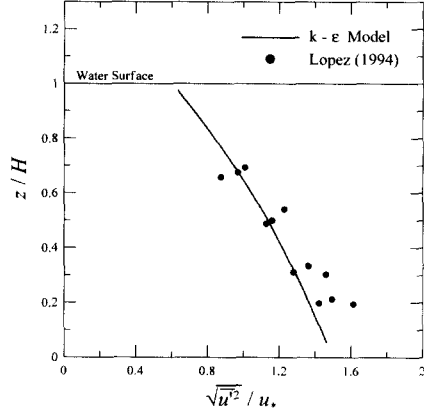
##### (1) 평균유속과 난류강도

그림 1(a)와 1(b)는 각각 평균유속분포와 난류강도의 분포를 나타낸 그림이다. 계산 결과를 Lopez(1994)의 실험결과와 비교하였다. 수치모의 조건으로는 수심 ( $H$ ) 0.24 m, 바닥경사 ( $S_o$ )는 0.0005를 사용하였다. 그림에 의하면 수치모형에 의한 계산결과와 실험값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 1(a)를 살펴보면 바닥근처에서 유속경사가 크고 수면으로 갈수록 작아지게 되므로 변동속도  $u'$ 의 절대값 역시 바닥근처에서 크고 수면으로 갈수록 작은 값을 갖게된다. 따라서 난류강도의 수직분포를 나타낸 그림 1(b)를 살펴보면 난류강도는 바닥면 부근에서 최대를 보이며 자유수면으로 갈수록 감소함을 알 수 있다.

##### (2) 난류에너지 생성과 소멸



(a) 평균유속 분포



(b) 난류강도 분포

그림 1. 일반 개수로에서 평균유속과 난류강도의 분포

그림 2는 깊이에 따른 난류에너지 생성과 소멸의 변화를 보여준다. 난류에너지 생성 ( $\overline{u'w'} du/dz$ )과 소멸( $\epsilon$ )을  $H/u_*^3$ 를 이용하여 무차원화 시켰으며, 수치모의 결과가 Lopez(1994)의 실험결과와 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있다. 난류에너지 생성과 소멸은 바닥면 근처에서 최대를 이루며, 바닥으로부터 약 20%의 거리까지는 수심방향으로 난류 에너지 생성과 소멸의 변화가 매우 크고, 그 이후부터는 수면으로 갈수록 변화량이 점차 작아짐을 볼 수 있다. 일반적으로

난류에너지 생성과 소멸은 연속적으로 이루어지며, 이러한 생성과 소멸의 과정을 지속하기 위해서는 에너지의 공급이 필요하다. 에너지의 공급은 속도 경사를 통해 평균류의 운동에너지로부터 연속적으로 이루어진다. 따라서 난류의 생성과 소멸은 속도경사의 크기에 의존하므로 바닥면 근처에서 최대를 이루고 수면으로 갈수록 작아진다. 또한 난류에너지 생성과 소멸의 값이 거의 동일하게 나타나는 에너지균형(energy balance) 상태를 이루고 있음을 볼 수 있다.

#### 4.2 식생된 개수로

##### (1) 평균유속

그림 3은 식생된 개수로에서 평균유속의 수직분포와 Lopez(1997)의 실험결과를 보여준다. 실험 조건으로는 수심( $H$ )은 0.335 m이고 바닥경사( $S_b$ )는 0.0036이며, 식생에 대해서는 식생 밀도( $a$ )는 1.09  $m^{-1}$ 이고 식생높이( $h_p$ )는 0.1175 m이다. 그림에서 계산결과가 측정된 유속분포와 유사한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 식생높이보다 높은 구간에서는 일반적인 개수로의 유속분포와 비슷한 대수 분포를 보이거나 식생높이 부분에서 속도경사가 커지며, 식생높이보다 낮은 구간에서는 일반 개수로의 유속분포와 전혀 다른 유속분포를 나타낸다. 이와 같이 식생높이 부근에서 유속변화가 크게 나타나는 이유는 Prandtl의 혼합거리 이론으로부터 유도되는 다음 식 (13)을 이용하여 설명할 수 있다.

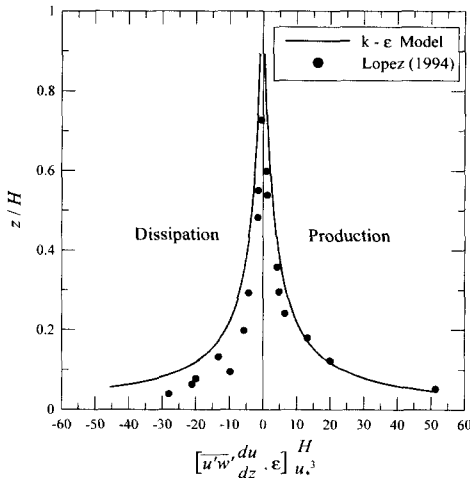


그림 2. 일반 개수로에서 난류에너지의 생성과 소멸

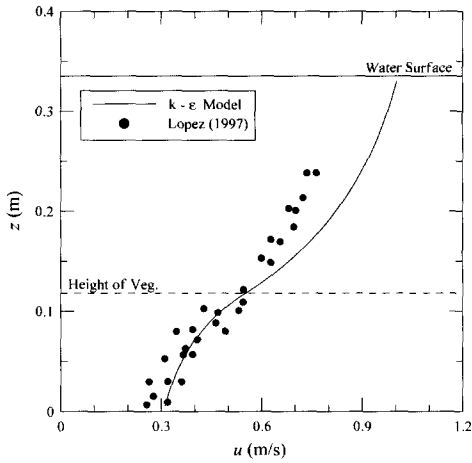


그림 3. 식생된 개수로에서 평균유속의 분포

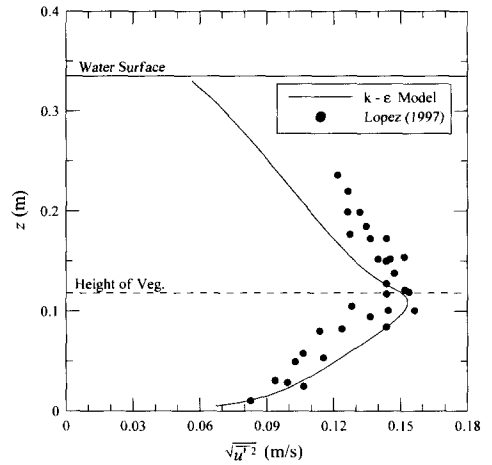


그림 4. 식생된 개수로에서 난류강도의 분포

$$\frac{du}{dz} = \frac{u_*}{xz} \quad (13)$$

즉 식생의 영향으로 인하여 식생높이 부근에서 마찰 속도가 증가되므로 속도경사 역시 증가하게 되는 것이다.

그림에서 식생높이보다 낮은 구간에서는 계산된 결과가 실험결과와 비슷하게 나타났으며, 식생에 의한 영향으로 인하여 평균유속이 감소하게 됨을 보여준다. 또한 식생높이보다 높은 구간에서는 계산된 결과가 실험결과와 다소 큰 차이를 보이고 있다. 이것은 본 연구에 사용된 수치모형이 등방성 난류모형이므로 실험에서 관측된 비등방성 효과를 반영하지 못하고 있는 것으로 보인다.

#### (2) 난류강도

그림 4는 식생된 개수로에서 깊이에 따른 난류강도의 변화를 보여준다. 일반 개수로에서의 난류강도는 바닥에서 최대를 이루지만, 식생된 개수로에서의 난류강도는 바닥에서 증가하여 식생높이 부근에서 최대가 되고 다시 수면으로 갈수록 감소함을 알 수 있다. 이는 식생의 영향으로 인해 식생높이 부근에서 유속경사가 커지게 되므로 변동속도  $u'$ 의 절대값 역시 커지게 된다. 따라서 난류강도가 식생높이 부근에서 최대 값을 갖고 수면 및 바닥으로 갈수록 작아지게 된다.

식생높이보다 낮은 구간에서는 계산된 결과가 실험결과와 비교적 비슷하게 나타났으며, 식생높이보다 높은 구간에서는 계산된 결과가 수치실험 결과에 비해

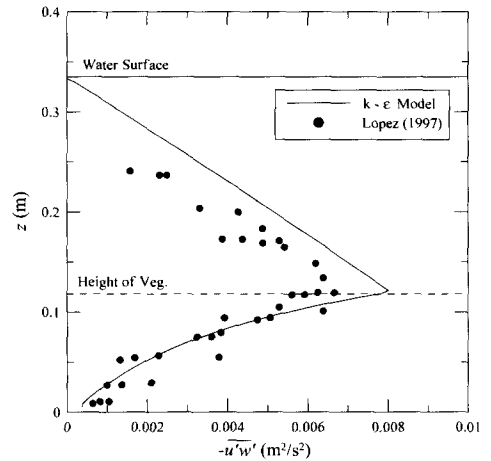


그림 5. 식생된 개수로에서 레이놀즈 응력의 분포

작게 나타났다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 식생높이보다 높은 구간에서 발생하는 비등방성 효과를 본 수치모형이 재현할 수 없기 때문이다.

#### (3) 레이놀즈 응력

그림 5는 단위밀도당 레이놀즈 응력의 수직분포를 보여준다. 레이놀즈 응력은 그림 4에서 제시된 난류강도의 수직분포와 마찬가지로 식생높이 부근에서 최대 값을 보이며 수면과 바닥, 양방향으로 감소하고 수면에서는 영이 됨을 알 수 있다. 또한 식생높이보다 낮은 구간에서는 실험결과와 비교적 잘 일치하나 식생높이보다 높은 구간에서는 실험결과에 비해 다소 크게 나

타난다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 본 연구에서 사용된 난류모형이 비등방성 효과를 재현할 수 없기 때문으로 보인다.

(4) 난류에너지 생성과 소멸

앞의 그림 2에서 제시한 바와 같이 일반 개수로에서 난류에너지의 생성은 바닥면 근처의 전단에 의해 발생하며, 바닥부근에서 난류에너지 생성과 소멸이 최대를 이룬다. 그러나 개수로 내에 식생이 있을 경우 난류에너지 생성은 바닥면과 식생높이 부근에서 발생하는 전단뿐만 아니라 식생에 의한 후류에 의해서도 난류에너지가 생성된다. 전단에 의한 난류에너지 생성을  $P_s$ 라고 후류에 의한 난류에너지 생성을  $P_w$ 라고 하면,  $P_s$ 와  $P_w$ 는 아래 식 (14)와 (15)와 같다.

$$P_s = - \overline{u'w'} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (14)$$

$$P_w = \frac{1}{2} C_D a u^3 \quad (15)$$

식생된 개수로에서 식생높이에 따라 침수식생과 정수식생을 갖는 개수로에서의 난류에너지 생성과 소멸의 변화를 비교하였다. 계산에 사용된 조건은 식생밀도  $a = 5.5 \text{ m}^{-1}$ , 식생높이  $h_p = 0.16 \text{ m}$ 일 때  $H/h_p = 1.0$ 과  $H/h_p = 2.75$ 로서 Nepf와 Vivoni(1999)의 수리실험조건과 동일한 조건을 사용하였다.

그림 6은  $H/h_p = 2.75$ 일 때 수심방향으로 계산된 난류에너지의 생성과 소멸을 도시한 것이다. 비교를 위하여 Nepf와 Vivoni(1999)의 실험결과도 함께 보였다. 계산된 결과가 측정된 자료와 유사한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 난류에너지 생성과 소멸은 식생높이 부근에서 최대를 이루고 수심과 바닥, 양방향으로 갈수록 감소함을 알 수 있다. 식생높이보다 낮은 구간에서는 식생에 의한 후류가 발생하므로 후류에 의한 난류에너지 생성( $P_w$ )이 전단에 의한 난류에너지 생성( $P_s$ )보다 더 큰 값을 나타낸다. 또한 식생높이보다 높은 구간에서는 일반 개수로와 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 식생높이 부근의 전단에 의해 발생하는 난류에너지 생성( $P_s$ )이 지배적임을 알 수 있다.

그림 7은 정수식생 조건인 경우( $H/h_p = 1.0$ ) 난류에너지 생성과 소멸의 분포를 보여준다. 전반적으로

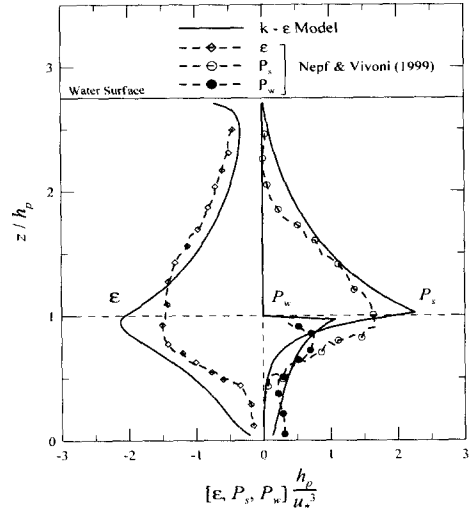


그림 6. 무차원 난류에너지의 생성과 소멸 (침수식생 조건:  $H/h_p=2.75$ )

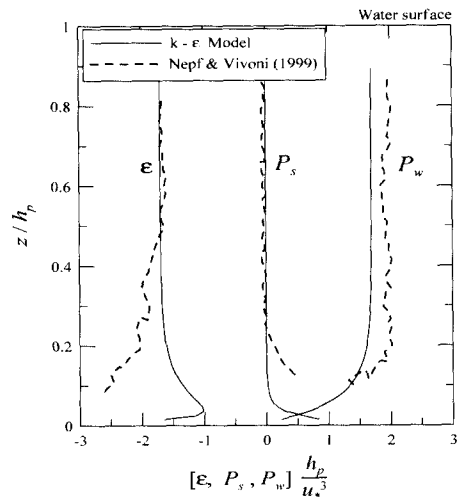


그림 7. 무차원 난류에너지의 생성과 소멸 (정수식생 조건:  $H/h_p=1.0$ )

계산된 결과와 측정된 결과가 유사한 경향을 보이고 있으나 바닥면 근처에서는 비교적 잘 일치하지 않음을 알 수 있다. 이는 수심에 따라 변하는 항력계수를 본 수치모의에서는 수심에 따라 일정하다고 가정하여 계산했기 때문인 것으로 판단된다. 난류에너지 생성은 수심 전반에 걸쳐 후류에 의해 발생하는  $P_w$ 가 지배적이며 바닥면 근처에서는 바닥면의 전단에 의한  $P_s$ 가

조금 발생한다. 식생의 영향으로 인해 수심 전반에 걸쳐 유속경사가 작아지므로 0.2H부터는 깊이에 따른 난류에너지 생성과 소멸의 값이 거의 일정한 값 ( $P_s \approx 0$ ,  $P_w \approx 1.65$ ,  $\epsilon \approx -1.65$ )을 나타내어 전체 수심에 걸쳐 에너지균형 상태를 이루고 있음을 확인할 수 있다.

## 5. 부유사 이동

### 5.1 하상에서 운동량의 전달

일반적으로 부유사 이동과정의 관점에서 부유사의 분포와 양을 결정할 수 있는 두가지 인자는 흐름에 의한 부유사의 수직방향 확산과 바닥면에서의 전달력이라 할 수 있다. 수직방향으로의 확산은 부유된 유사를 수중에 계속 부유시키는 역할을 하며, 바닥면에서의 전달력은 바닥면에 있는 유사를 수중으로 부상시키는데 중요한 역할을 한다. 그림 8은 식생밀도에 대한 하상에서 운동량 전달의 변화를 보여준다. 그림에서 식생의 영향으로 인한 하상에서 운동량 전달현상을 정량적으로 파악하기 위하여 전달속도를 사용하였다. 즉,  $u_{*(veg)}$ 는 식생된 개수로에서의 전달속도이고,  $\sqrt{gHS}$ 는 식생된 개수로와 동일한 수심과 바다경사를 갖는 일반 개수로에서의 전달속도이다. 그림 8에서 식생밀도가 증가할수록  $u_{*(veg)}$ 의 값이 감소하여 하상에서의 운동량 전달이 작아짐을 알 수 있다. 또한 무차원 식생밀도  $Ha$ 가 약 0.001보다 작은 경우 하상에서 운동량 전달

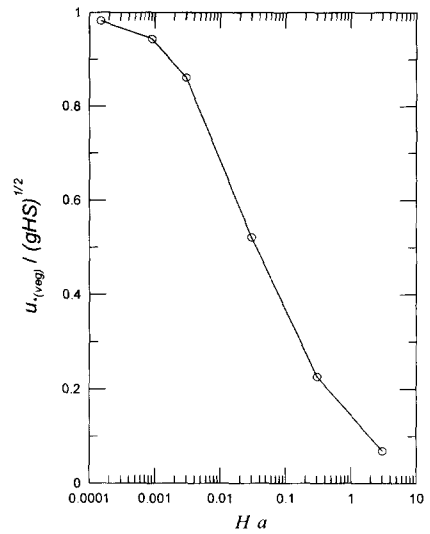
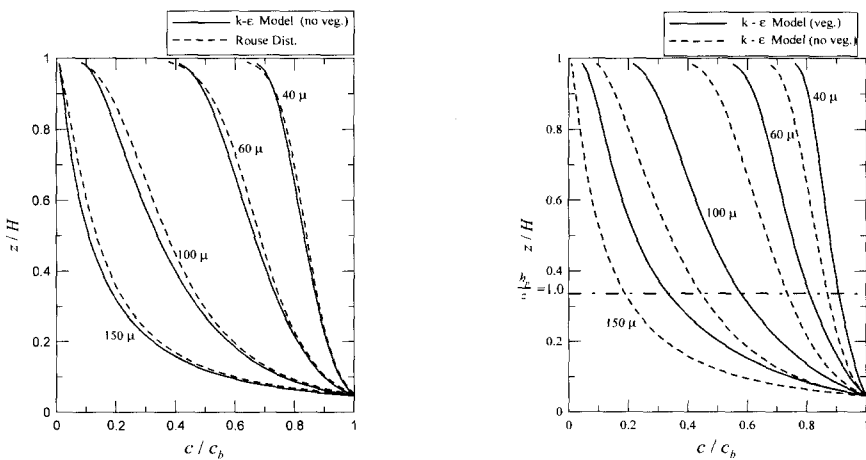


그림 8. 무차원 식생밀도에 따른 하상에서 운동량의 전달

의 변화폭이 작으나  $Ha$ 가 약 0.001 보다 큰 경우는 식생밀도에 따른 운동량 전달의 변화가 매우 커지는 양상을 볼 수 있다.

### 5.2 무차원 농도분포

그림 9(a)는 일반 개수로에서 수심에 따른 농도분포를 보여준다. 부유사 입자 크기의 변화에 따른 영향을 살펴보기 위하여, 네가지 크기의 입자를 사용하였고



(a) 일반 개수로에서 수심모의와 Rouse분포 비교

(b) 식생의 유무에 따른 수심모의 비교

그림 9. 부유사 농도분포



(40, 60, 100, 150  $\mu$ ), 계산결과와의 비교를 위하여 Rouse 분포도 함께 도시하였다. 부유사의 농도분포를 산정하기 위한 Rouse 공식은 아래 식 (16)과 같다.

$$\frac{c}{c_b} = \left( \frac{H-z}{z} \frac{b}{H-b} \right)^z \quad (16)$$

여기서  $c_b = c|_{z=b}$ ,  $b = 0.05 H$ , 그리고  $Z = w_s / (\chi u_*')$ 를 나타낸다. 그림 9(a)에 의하면 식 생이 없는 일반 개수로에서  $k-\epsilon$  난류모형과 Rouse 공식에 의한 부유사의 농도분포가 매우 근사함을 확인할 수 있으며, 대체적으로 수치모의에 의한 값이 Rouse 공식에 의한 값보다 약간 작음을 알 수 있다. 그림 9(b)는 식생된 개수로와 일반 개수로에서 부유사 농도분포에 대한 수치모의 결과를 비교한 그림이다. 네 가지 입자 모두에 대하여 식생된 개수로에서의 부유사 농도분포가 일반 개수로 보다 더 균일한 것으로 나타났으며, 입자의 크기가 커짐에 따라 이러한 차이는 더욱더 두드러짐을 알 수 있다. 그림 9(b)에서 부유사 농도를 무차원화시키기 위해 사용한  $c_b$ 의 값이 서로 다르므로 두 농도분포로부터 유사량을 비교하기는 어려우며, 일반 개수로의 경우와 유사량을 비교한 것은

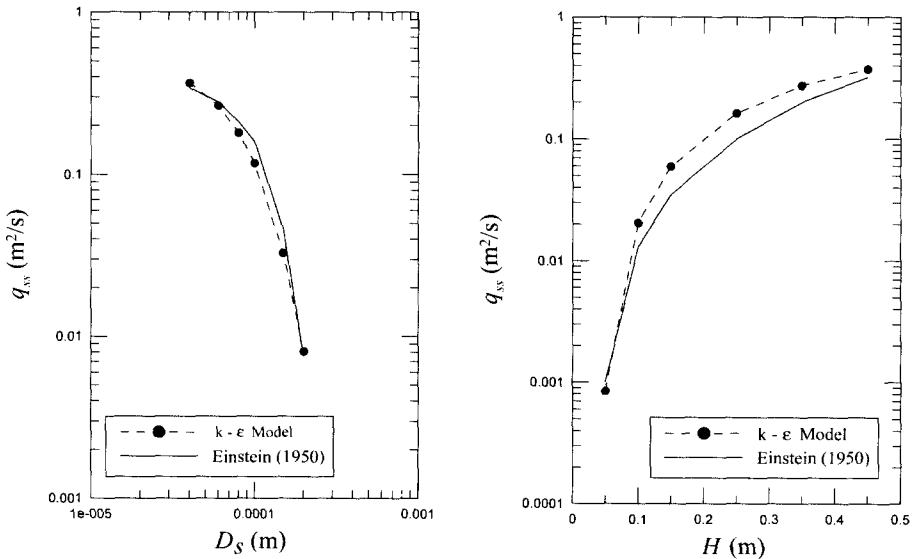
그림 11에 도시하였다.

### 5.3 부유사량

그림 10(a)는 일반 개수로에서 부유사 입자의 크기 변화에 따른 부유사량의 변화를 보여준다. 수치모의에 의해 계산된 결과를 Einstein 공식(1950)과 비교하였으며, 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. Einstein 공식은 아래 식 (17)과 같다.

$$q_{ss} = \frac{1}{\chi} c_b u_*' H \left[ I_1 \ln \left( 30 \frac{H}{k_c} \right) + I_2 \right] \quad (17)$$

여기서  $q_{ss}$ 는 부유사량이고,  $k_c$ 는 하상형상의 효과를 포함하는 복합조도(composite roughness)를 나타내며,  $I_1$ 과  $I_2$ 는 Rouse 계수( $Z$ )와  $z/H$ 로 구성된 함수이다. 수치모의에서 부유사량은 평균유속과 평균농도의 곱( $uc$ )을 수직적분하여 구할 수 있다. 그림에서 부유사 입자의 크기를 40  $\mu$ -200  $\mu$ 까지 변화시켰을 경우 부유사 입자의 크기가 증가함에 따라 부유사량은 감소하며, 입자의 크기가 약 100  $\mu$ 보다 큰 경우에는  $q_{ss}$ 의 변화도 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 10(b)는 일반 개수로에서 수심에 따른 부유사량의 변



(a) 입자크기에 따른 변화

(b) 수심에 따른 변화

그림 10. 일반 개수로에서 부유사량의 변화

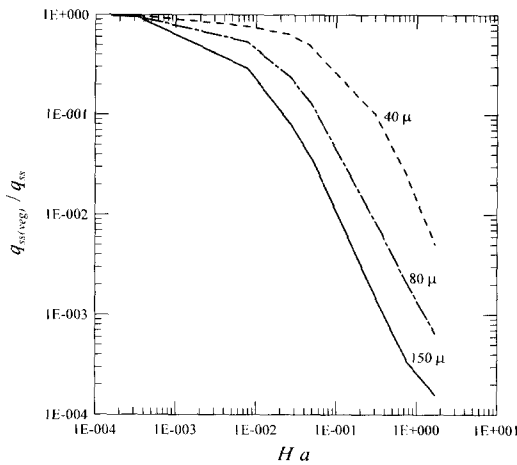


그림 11. 식생된 개수로에서 식생밀도에 대한 부유사량의 변화

화를 나타낸 그림이다. 수치모의에 사용된 부유사 입자의 크기는  $80 \mu\text{m}$ 이며,  $0.05 \text{ m}$ - $0.45 \text{ m}$ 까지 수심을 변화시켜 부유사량을 계산하였다. 그 결과 수심이 증가할수록 부유사량  $q_{ss}$ 의 값은 증가하며 수심이 약  $0.15 \text{ m}$ 보다 클 경우  $q_{ss}$ 의 변화가 작아짐을 확인할 수 있다.

그림 11은 무차원 식생밀도 ( $Ha$ )에 대한 식생된 개수로에서의 부유사량의 변화를 보여준다. 그림의 세로축은 비교를 위하여 일반 개수로에서의 부유사량 ( $q_{ss}$ )과 식생된 개수로에서의 부유사량 ( $q_{ss(veg)}$ )에 대한 비를 도시하였다. 또한 다양한 크기의 부유사( $40, 80, 150 \mu\text{m}$ )를 사용하여 수치모의의 함으로써 이에 대한 영향을 살펴보았다. 계산에 사용된 유량과 수로경사는 각각  $q = 1.12 \text{ m}^2/\text{s}$ 와  $S_o = 0.0036$  이다. 그림에 의하면 무차원 식생밀도가 증가할수록 부유사량은 감소하며, 동일한 식생밀도에 대해서 유사입자의 크기가 작을수록 수송되는 부유사의 양은 큰 것으로 나타났다. 이것은 유사입자가 클수록 식생에 의한 난류강도 변화에 더욱 큰 영향을 받기 때문이다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 식생된 개수로에서 난류구조를 파악하고 부유사이동에 대한 식생의 영향을 검토하기 위해 수치해석을 실시하였다. 난류폐합식으로는 2-방정식 모형으로서 등방성 난류모형인  $k-\epsilon$  모형을 이용하였

다. 일차원의 수직모형을 구성하여 평균유속, 난류강도, 레이놀즈 응력, 난류에너지의 생성 및 소멸에 대하여 각각 살펴보았으며 식생이 없는 일반 개수로의 경우와 비교하였다. 식생된 개수로에서 부유사량을 산정하기 위하여 지배방정식과 함께 부유사 보존방정식도 수치 해석하여 하상에서의 운동량 전달, 부유사의 농도변화, 수심적분된 부유사량을 계산하였다. 이상의 수치모의 결과를 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

침수식생을 갖는 개수로에서 식생에 의한 항력으로 말미암아 유속분포가 전반적으로 약화되며 식생높이 부근에서 유속경사가 커짐을 확인하였다. 이에 따라 난류강도와 레이놀즈 응력의 값이 식생높이에서 최대값을 형성하였고, 수면과 바닥으로 갈수록 감소하는 것을 확인하였다. 난류에너지의 생성 및 소멸도 식생높이 부근에서 최대값을 보이고 수면과 바닥으로 갈수록 감소하는 양상을 보였다. 또한 식생높이보다 낮은 구간에서는 후류에 의한 난류에너지 생성이 지배적이며, 식생높이보다 높은 구간에서는 전단에 의한 난류에너지 생성이 지배적임을 확인할 수 있었다. 한편, 식생의 높이가 수심보다 큰 정수식생 조건일 경우, 전체 수심에 걸쳐 후류에 의한 난류에너지 생성이 지배적으로 발생하였다.

하상에서의 운동량 전달을 검토한 결과 식생밀도가 증가할수록 운동량 전달이 감소하여 유사유입 (sediment entrainment into suspension)에 영향을 줄 수 있음을 확인하였다. 식생된 개수로에서의 부유사는 일반 개수로에 비해 전 수심에 걸쳐 균일하게 분포하였으며, 유사 입자의 크기가 증가할수록 일반 개수로의 농도분포와는 큰 차이를 보였다. 동일한 바닥경사와 유량에 대해서 식생밀도가 증가할수록 부유사량은 감소하며, 동일한 식생밀도에 대해서 입자의 크기가 작을수록 부유사량이 증가함을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 교육부의 “두뇌한국 21(Brain Korea 21)” 지원에 의해 수행되었음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 권기원, 최성욱 (2000). “식생된 개수로 흐름의  $k-\epsilon$  난류해석.” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제20권, 제1-B호, pp. 11~21.  
이원환 (1997). 하천공학, 동명사.

- 우효섭, 이진원, 이두한, 박재로 (1999). "생물재료를 이용한 저수호안의 세굴저항성 평가 - 하천복원 시험연구 결과의 기술전파." 대한토목학회지, 대한토목학회, 제47회, 제11호, pp. 71~80.
- Burke, R.W. and Stolzenbach, K.D. (1983). *Free surface flow through salt marsh grass*. MIT-Sea Grant Report MITSG 83-16, Cambridge Mass., 252.
- Celik, I. and Rodi, W. (1984). "Simulation of free-surface effects in turbulence channel flows." *Physico-Chem. Hydrodyn.*, Vol. 5, pp. 217~227.
- Choi, S.U. (1999a). "Backwater computation for vegetated compound open-channel flows." *ASCE International Water Resources Engineering Conference*, Seattle, USA.
- Choi, S.U. (1999b). "Backwater equation for vegetated open-channel flows." *Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 3, No. 4, pp. 369~377.
- Demissie, M. (1990). "Sediment yield and accumulation in the Cache River." *National Hydraulic Engineering Conference*, ASCE, San Diego, California.
- 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.
- Einstein, H.A. (1950). *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows*. U.S. Department Agriculture, Soil Conservation Service, T.B. No. 1026.
- Garcia, M. and Parker, G. (1991). "Entrainment of bed sediment into suspension." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 4, pp. 414~435.
- Hayes, J.C., Barfield, B.J., and Barnhisel, R.I. (1978). "Evaluation of grass characteristics related to sediment filtration." Meeting of the American Society of Agricultural Engineers, Chicago, 78-2513.
- Hossain, M.S. (1980). *Mathematische modellierung von turbulenten auftriebsströmungen*. Ph.D. Thesis, University of Karlsruhe, Germany.
- Lauder, B.E. and Spalding, D.B. (1974). "The numerical computation of turbulent flow." *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 3, 269-289.
- Lopez, F. (1994). *Near-wall turbulent coherent structures and their role on sediment transport in smooth-bed open-channel flows*. M.S. Thesis, University of Illinois at Urbana - Champaign.
- Lopez, F. (1997). *Open-channel flow with roughness elements of different spanwise aspect ratios: Turbulence Structure and Numerical Modeling*. Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL.
- 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.
- Lopez, F. and Garcia, M. (1998). "Open-channel flow through simulated vegetation: Suspended sediment transport modeling." *Water Resource Research*, IAHR, Vol. 34, No. 9, pp. 2341~2352.
- 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.
- Nepf, H.M. (1999). "Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation." *Water Resource Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 479~489.
- Nepf, H.M. and Vivoni, E.R. (1999). "Turbulence structure in depth-limited, vegetated flow: Transition between emergent and submerged regimes." *28th IAHR congress*, Graz, Austria.
- Rodi, W. (1993). *Turbulence models and their*

*application in hydraulics: A state of the art.* 3rd Edition, International Association for Hydraulic Research, Delft, The Netherlands.  
Svensson, U. (1998). *PROBE. Swedish Meteorological and Hydrological Institute*, Norrköping, Sweden.

Tollner, E.W., Barfield, B.J., and Haynes, J.C. (1982). "Sedimentology of erect vegetal filters." *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 108, No. 12, pp. 1518~1531.

(논문번호:00-027/접수:2000.04.21/심사완료:2000.08.25)