

$k-\varepsilon$ 난류모형을 이용한 대응 식생수로 흐름 수치모의

Numerical Investigations of Open-Channel Flows with Alternate Vegetation using $k-\varepsilon$ model

강형식¹⁾ · 김규호²⁾

Kang, Hyeongsik · Kim, Kyu-Ho

요 지

본 연구에서는 주흐름방향으로 식생 영역이 교차적으로 존재하는 개수로 흐름에 대한 3차원 수치모의를 수행하였다. 지배방정식의 난류 폐합을 위해 $k-\varepsilon$ 난류모형을 이용하였다. 먼저, 하상의 일부만 식재된 부분 식생 수로를 수치모의 하고 기존의 실험 결과와 비교하였다. 그 결과 본 모형이 평균유속 분포를 매우 잘 예측하는 것으로 나타났으나, 레이놀즈응력 분포는 실험 결과에 비해 비식생영역에서는 다소 과소 산정하고 식생영역에서는 과대 산정하는 것으로 나타났다. 이는 본 모형이 등방성 모형이기 때문에 식생 경계부에서 발생하는 난류의 비등방성 효과를 정확히 예측할 수 없기 때문인 것으로 판단된다. 또한 주흐름방향으로 식생 영역이 교차적으로 존재하는 대응 식생 수로를 수치모의하고, 계산 결과를 기존의 실험 결과와 비교하였다. 그 결과 본 모형이 대응 식생 수로에서의 유속 분포를 매우 잘 예측하는 것으로 나타났다. 또한 식생 밀도가 증가함에 따라 식생이 흐름 방향을 변화시켜 점차 만곡수로와 유사한 형태의 흐름이 형성되는 것으로 나타났다.

핵심용어: 대응 식생, 난류모형, 식생 밀도, 유속

1. 서론

일반적으로 식생은 하천 복원 사업에 있어 중요한 재료로 사용된다. 특히, 임의의 하천에 식생 군집이 공간상에 교차적으로 놓여있는 경우, 직선으로 흐르는 하천을 만곡으로 흐르게 하여 하천 공간에서의 유속 범위를 풍부하게 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 환경 기능이 저하된 하천에서는 다양한 수심 및 유속 범위가 형성되어 생물종의 다양성을 기대할 수 있으며, 식생군집의 뒷공간은 생물의 은신처 및 서식처로 활용될 것으로 기대된다. 이와 같이 공간상에 식생군집이 존재하는 흐름을 해석하기 위해서는 수심적분 2차원 및 3차원 모형이 필요하다. 2차원 모형은 Tsujimoto(1999), Wu와 Wang(2004)이 있다. 이들은 $k-\varepsilon$ 모형을 이용하여 식생 수로에 대한 흐름 및 하상변동 모형을 개발하였다. 그러나 Tsujimoto(1999)의 모형은 식생의 높이가 수심 보다 큰 정수식생에서만 모의가 가능한 단점이 있으며, Wu와 Wang(2004)은 Stone과 Shen(2002)이

1) 정회원, 한국건설기술연구원 박사후연구원 (kanghs@kict.re.kr)

2) 정회원, 한국건설기술연구원 책임연구원 (khkimschoi@yonsei.ac.kr)

제시한 식생영역 내부와 전 수심에서의 유속 분포식을 이용하여 침수식생 수로에서의 흐름 모형을 개발하였다. 그러나 수치모의 결과의 검증에 사용된 실험 조건은 모두 정수식생 수로에 대한 것으로서 침수식생에 대한 비교는 수행하지 않았다. 일반적으로 침수식생 수로에서는 식생 높이 부근에서 강한 전단층이 형성되고, 바닥 전단응력은 감소된다. 따라서 침수식생 수로를 수치모의하기 위해서는 전체 저항력에서 전단력과 형상 항력을 분리하여 모의해야한다.

본 연구에서는 $k-\varepsilon$ 기반 3차원 모형을 이용하여 식생 구간이 흐름 방향으로 교차적으로 연속해서 존재하는 대응식생 수로에 대한 3차원 수치모의를 수행하였다. 먼저 하상의 일부만 식재된 부분 식생 수로를 수치모의하고 기존의 실험결과와 비교하였다. 또한 식생 밀도 별 대응식생 수로를 수치모의하고, 식생으로 인한 흐름 변화를 검토하였다.

2. 수치모형

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

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

여기서 $\langle \bar{u}_i \rangle$ 는 i -방향으로의 평균유속, ρ 는 유체 밀도, \bar{p} 는 평균압력, f_i 는 식생에 의한 항력, $\langle \bar{u}_i' u_j' \rangle$ 는 레이놀즈응력이다. 본 연구에서는 레이놀즈응력을 위해 난류점성개념을 이용하였으며, 난류점성을 계산하기 위해 난류운동에너지 k 와 k 의 소산률인 ε 을 이용하여 수치모의하였다. 각각의 k 와 ε 의 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle \bar{u}_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k + C_{fk} f_x \langle \bar{u} \rangle - \varepsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle \bar{u}_j \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + P_k \frac{\varepsilon}{k} C_{\varepsilon 1} + C_{f\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} f_x \langle \bar{u} \rangle - \frac{\varepsilon^2}{k} C_{\varepsilon 2} \quad (3)$$

여기서 σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ 는 모형상수로서 Launder와 Spalding(1974)의 표준값을 이용하였으며, C_{fk} 와 $C_{f\varepsilon}$ 은 식생에 대한 항력가중계수로서 본 연구에서는 강형식과 최성욱(2006)의 연구 결과에 따라 $C_{fk} = C_{f\varepsilon} = 0$ 으로 하였다. 지배방정식의 수치모의를 위해 유한체적법을 이용하였으며, 자유수면에서는 대칭평면조건을 이용하고 벽 경계에서는 벽법칙 및 벽함수를 이용하였다. 한편, 각 계산점에서의 압력값을 이용하여 수위변화를 모의하였다.

3. 계산 결과

그림 1은 하폭의 일부가 식재된 부분식생 수로에서의 평균유속 및 레이놀즈응력 분포도이다. 계산에 사용된 수치모의 조건은 Tsujimoto와 Kitamura(1995)의 실험조건을 이용하였다.

Tsujimoto와 Kitamura(1995)의 실험에 사용된 수로 길이는 12 m, 수심 $H = 0.028$ m, 수로 폭 $B = 0.4$ m, 식생이 식재된 수로 폭 은 0.12 m, 바닥경사 $S = 0.0017$ 이다.

그림 1(a)의 유속 분포도를 보면, 수치모의와 실험 결과가 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 특히, 식생영역에서는 유속이 거의 균일하고 식생과 비식생의 경계부에서는 큰 유속차에 의해 강한 전단층이 형성되는데, 수치모의가 이러한 현상을 잘 예측하는 것을 볼 수 있다. 그림1(b)는 레이놀즈응력 분포도이다. 그림을 살펴보면, 식생과 비식생의 접합부 근처에서 레이놀즈응력이 급격히 감소 혹은 증가되며, 접합부에서 최대를 이루는 것을 볼 수 있다. 계산결과를 실험결과와 비교해 보면 전반적으로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 수치모의 결과에서는 비식생수로에서 다소 과소산정하고, 식생 수로에서는 접합부 근처에서 과대산정하다 벽 경계로 갈수록 다시 과소산정하는 것으로 나타났다. 특히, 레이놀즈응력의 최대점이 실험결과와 달리 식생 영역에서 발생되는데, 이는 본 모형이 등방성의 $k-\epsilon$ 모형이기 때문인 것으로 보인다. 즉, 식생수로에서는 식생과 비식생 영역의 접합부 근처에서 강한 비등방성의 난류가 형성되어 운동량 전달에 영향을 미치게 되는데, 본 모형과 같은 등방성 모형에서는 난류의 비등방성 효과를 고려할 수 없기 때문에 횡방향으로의 운동량 전달 효과를 정확히 모의할 수 없는 것으로 판단된다.

그림 2는 반원의 식생 영역이 지그재그 형태로 놓여 있는 대응식생 수로에 대한 x-y평면 격자 구성도이다. 여기서 x는 주흐름방향이고 y는 횡방향이다. 수치모의 조건은 Bennett 등(2002)의 실험 조건을 이용하였으며, 식생 직경 3.2mm, 식생 밀도 a는 0.64%, 9.97%, 유량은 0.0042 cms, 식생밀도 별 수심은 0.026m, 0.036m이다. 한편, 식생밀도의 정의는 식생이 차지하는 면적에 대한 식생 면적의 비로하였다. 유속 분포에 대한 결과를 실험 결과와 비교한 결과 식생 밀도에 따라 서로 잘 일치하는 것으로 확인되었으나, 이에 대한 결과는 생략하였다.

그림 3은 자유수면에서 계산된 유속 벡터도이다. 식생밀도가 증가함에 따라 식생이 흐름방향을 변화시켜 만곡수로와 유사한 형태의 흐름이 형성되는 것을 볼 수 있다. 특히, 식생밀도가 9.97%인 경우 식생영역의 하류 구간에서 거의 영에 가까운 유속이 형성되고, 그 반대편에서는 식생에 의해 배제된 유량의 집중 효과로 유속이 증가되었다가 하류단의 또 다른 식생을 만나면서 흐름 방향이 바뀌게 되고 반대 측벽과 부딪히면서 재순환 흐름이 형성되는 것을 볼 수 있다.

그림 4는 $x = 2.5$ m에서의 y-z평면에 대한 주흐름방향 유속 분포도이다. 그림을 살펴보면, 식생밀도가 0.64%인 경우, 최대 유속이 수로 중앙에서 좌측벽쪽으로 이동된 것을 볼 수 있으며, 식생밀도가 9.97%에서는 최대 유속의 이동 거리가 더욱 증가되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 $k-\epsilon$ 모형을 이용하여 부분 식생 수로 및 대응식생 개수로 흐름을 수치모의하였다. 먼저, 부분식생 수로를 수치모의한 결과, 본 모형이 유속 분포도 및 레이놀즈응력 분포도를 비교적 정확히 모의할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 식생과 비식생 영역의 접합부에서 발생하는 난류의 비등방 효과를 반영할 수 없기 때문에 이로 인한 횡방향 운동량 전달효과를 정확히 예측할 수 없는 것으로 확인되었다. 한편, 식생 밀도별 대응식생 수로를 수치모의한 결과, 식생 밀도

가 증가함에 따라 식생이 흐름 방향을 변화시켜 점차 만곡수로와 유사한 형태의 흐름 양상을 갖는 것을 확인하였다. 특히 식생 밀도가 9.97%인 경우, 식생 영역의 반대 측벽 부근에서 재순환 흐름이 형성되는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 강형식, 최성욱 (2006). “식생된 개수로에서 항력가중계수가 흐름에 미치는 영향 분석.” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 26(5B), 529-537.
- Bennett, S.J., Primm, T., and Barkdoll, B.D. (2002). "Using simulated emergent vegetation to alter stream flow direction within a straight experimental channel." *Geomorphology*, 44, 115-126.
- Lauder, B.E. and Spalding, D.B. (1974). "The numerical computation of turbulent flow." *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 3, 269-289.
- Tsujimoto, T. (1999). "Fluvial processes in streams with vegetation." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 37(6), 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 Hydroscience and Hydraulic Engineering*, JSCE, 13, 35-45.
- 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 *Raparian Vegetation and Fluvial Geomorphology*, edited by Bennett, Water Science and Application 8, 253-265.

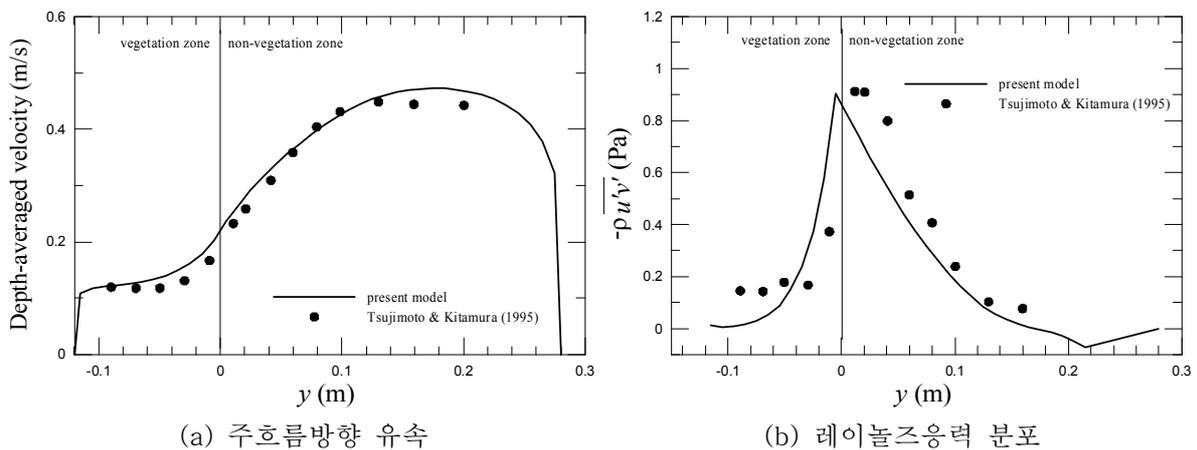


그림 1. 부분식생 수로에서의 유속 및 레이놀즈응력 분포

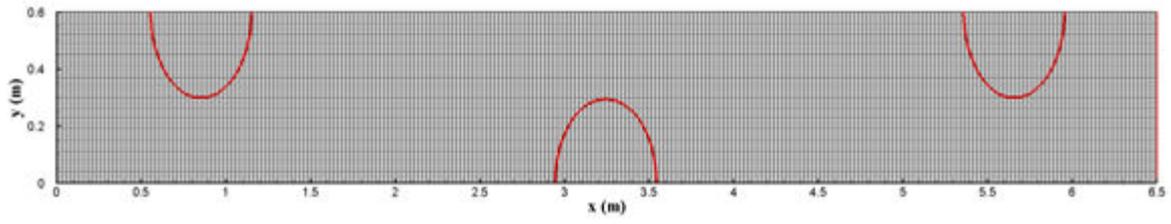
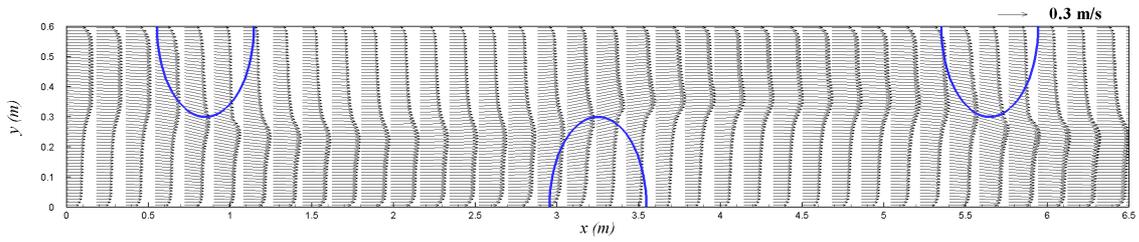
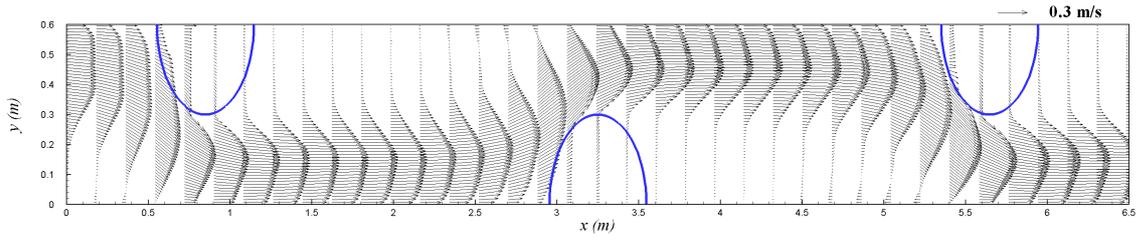


그림 2. 대응식생 수로에 대한 x-y평면 계산격자

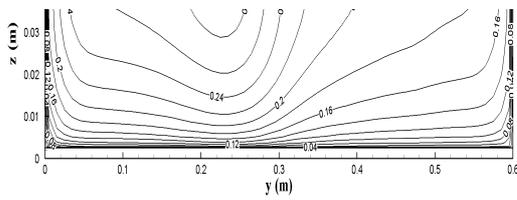


(a) $a = 0.64\%$

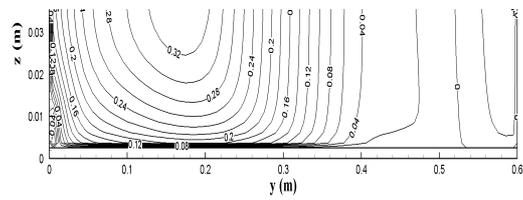


(b) $a = 9.97\%$

그림 3. 대응식생 수로에 대한 자유수면 유속 벡터도



(a) $a = 0.64\%$



(b) $a = 9.97\%$

그림 4. $x=2.5m$ 에서의 주흐름방향 유속 분포도