

복복단면 개수로 흐름의 난류모델링

Turbulence Modeling of Double Compound Open-Channel Flows

최성욱¹, 정영훈²

1. 서론

복복단면 수로란 기존의 복단면 수로에 대해 하천 주수로의 일부를 굴착하여 최심부 수로를 갖는 하천을 의미한다. 복복단면 수로를 조성함으로써 수심을 확보하여 물고기 등 수중 생물의 서식에 적합한 수심을 확보할 수 있고, 우수 단면적이 축소되어 유속 증가의 효과가 있으며 이로 인한 토사의 퇴적을 방지할 수 있다. 또한 유속이 없는 사수역을 제거하여 수질 향상을 도모할 수 있다. 복복단면 수로의 흐름구조는 매우 복잡하며 새로운 형태의 이차흐름 (secondary current)이 발생하게 된다. 또한 이차흐름 구조의 변화는 하천의 통수능에 영향을 미칠 수 있고 최심부 수로의 빠른 유속으로 인한 측방 호안의 보호 등이 문제될 수 있다. 기존의 복단면 수로에 대해 많은 연구가 진행되고 있으나, 복복단면 수로에 대한 수리학적 연구는 매우 미흡한 실정이다. 기존의 복단면 수로에 대한 연구 결과를 토대로 예상해 보건대 복복단면 수로에 위치하는 두 개의 접합부 (junction region)에서 흐름의 큰 변화가 예상된다.

본 연구에서는 난류모형을 사용하여 복복단면 개수로의 흐름을 수치모의하여 이차흐름, 주흐름방향의 유속분포, 바닥전단응력을 산정하였다. 난류모형으로는 Speziale (1987)이 제시한 비선형 $k-\varepsilon$ 모형을 사용하였다. Shiono와 Lin (1992)은 복단면 수로에 대해 Speziale (1987)의 모형의 적용성을 검증한 바 있다. 모형의 검증을 위해 Tominaga와 Nezu (1991)가 복단면 수로에서 실험한 자료와 비교하였다.

2. 지배방정식

지배방정식은 연속방정식, 주흐름방향 (x), 횡방향 (y), 그리고 바닥면에 수직방향 (z)의 운동량방정식으로 구성된다. 흐름을 x 방향에 대해 완전히 발달된 등류상태로 가정하면 시간에 따른 경사항과 x 방향의 경사항은 영이 되어 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

¹ 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수(schoi@yonsei.ac.kr)

² 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정(truss96@yahoo.co.kr)

$$V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = gS_0 + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial U}{\partial y} - \overline{u'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{u'w'} \right) \quad (2)$$

$$V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial V}{\partial y} - \overline{v'^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial V}{\partial z} - \overline{v'w'} \right) \quad (3)$$

$$V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial W}{\partial y} - \overline{v'w'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial W}{\partial z} - \overline{w'^2} \right) \quad (4)$$

여기서 U , V , W 는 각각 x , y , z 방향의 시간평균된 유속, P 는 시간평균된 압력, ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도, S_0 는 바닥경사이며, $\overline{u'v'}$, $\overline{u'w'}$, $\overline{v'^2}$, $\overline{v'w'}$ 그리고 $\overline{w'^2}$ 는 레이놀즈 응력이다.

3. 비선형 $k-\varepsilon$ 모형

본 연구에서는 지배방정식의 폐합문제를 해결하기 위한 난류모형으로 비선형 $k-\varepsilon$ 모형을 사용하였다. 비선형 $k-\varepsilon$ 모형은 표준 $k-\varepsilon$ 모형의 등방성 가정에 의한 단점을 극복한 모형으로서 이차흐름을 모의할 수 있다. 비선형 $k-\varepsilon$ 모형은 Speziale (1987), Nisizima와 Yoshizawa (1987), 그리고 Rubinstein과 Barton (1990) 등에 의해 제안되었다. Shiono와 Lin (1992)은 Speziale (1987)이 제시한 비선형 $k-\varepsilon$ 모형이 복단면 개수로에서 이차흐름을 잘 모의하고 그 결과가 실험과 잘 일치한다는 것을 밝혔다. 따라서 본 연구에서는 복단면 수로에서 적용성이 검토된 Speziale (1987)의 모형을 사용하였다. $k-\varepsilon$ 모형에서 k 와 ε 의 수송방정식은 다음과 같다.

$$V \frac{\partial k}{\partial y} + W \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + P_k - \varepsilon \quad (5)$$

$$V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + W \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

여기서 k 는 난류운동에너지, ε 은 난류운동에너지 소산률, σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ 는 경험상수로서 본 연구에서는 Launder와 Spalding (1974)이 제시한 $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $C_{\varepsilon 1}=1.44$, $C_{\varepsilon 2}=1.92$ 를 사용하였다. v_t 는 난류동점성계수로서 다음 식과 같다.

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

여기서 C_μ 는 경험상수로서 Launder와 Spalding (1974)은 0.09를 제시하였다. P_k 는 난류운동에너지의 생성항으로 다음과 같다.

$$P_k = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

여기서 $-\overline{u'_i u'_j}$ 는 레이놀즈 응력으로 다음과 같이 표현된다.

$$-\overline{u'_i u'_j} = -\frac{2}{3} k \delta_{ij} + v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{3} \left(\sum_{m=1}^3 C_{tm} \frac{k^3}{\varepsilon^2} S_{mij} \right) - \sum_{m=1}^3 C_{tm} \frac{k^3}{\varepsilon^2} S_{mij} \quad (9)$$

여기서 δ_{ij} 는 Kronecker delta, C_{tm} 은 비선형 $k-\varepsilon$ 모형의 모형상수로서 표 1에 나타내었으며 S_{mij} 는 다음과 같은 속도경사로 나타낼 수 있다.

$$S_{1ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \quad (10)$$

$$S_{2ij} = \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

$$S_{3ij} = \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} \quad (12)$$

4. 수치모형의 검증

본 연구에서 수치모의를 위한 적용조건은 Tominaga와 Nezu (1991)의 S-2 실험조건과 동일한 것으로 홍수터를 비롯한 모든 바닥면과 벽면을 매끄러운 하상으로 가정하였다. 복단면 수로의 개념도와 적용조건을 각각 그림 1과 표 2에 나타내었다. 수치모의를 위해 도입된 격자수는 주수로에서 y -방향으로 75 개, z -방향으로 30 개이며, 홍수터에서 y -방향으로 75 개, z -방향으로 15 개이다. 해의 수렴까지 반복횟수는 약 10,000 번이 소요되었다. 그림 1과 표 2에서 H 는 수로 수심, h_f 는 홍수터 수심, B 는 총 수로폭, b_f 는 홍수터 폭, U_c 는 마찰속도, U_m 은 주흐름방향의 단면평균유속, Re 는 레이놀즈 수 그리고 Fr 은 Froude 수이다.

그림 3을 보면 수치모의를 통해 접합부에서 강한 이차흐름이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Tominaga와 Nezu (1991)는 실험에서 이차흐름의 최대크기가 주흐름방향 최대유속 U_{max} 의 약 2.5 %에서 3.5 % 정도라고 밝힌 바 있다. 수치모의결과를 실험과 비교하였을 때 접합부에서 이차흐름의 크기가 약간 과대산정되었지만 접합부 부근의 수면에서 솟아오르는 와 (渦)의 형상을 비교적 잘 모의하였다고 판단하였다.

그림 4는 최대유속 U_{max} 로 무차원된 주흐름방향의 유속분포를 나타낸 것이다. 실험과 비선형 $k-\epsilon$ 모형의 경우 접합부에서 이차흐름에 의해 주흐름방향 유속이 감소하여 등속선이 왜곡된 형상을 보여주고 있다. 그러나 $k-\epsilon$ 모형의 ϵ 자유수면 경계조건이 자유수면효과를 미약하게 반영하기 때문에 실제현상과 상이한 결과를 낳는 것을 알 수 있었다.

그림 7에는 바닥전단응력 τ_b 의 횡방향 분포를 도시하였다. 그림에서 바닥전단응력은 전체 단면에 대한 평균값 (τ_m)으로 무차원시켰다. 그림에서 알 수 있듯이 홍수터에서 접합부에 접근할수록 바닥전단응력이 증가한다. 홍수터에서 접합부에 접근할수록 바닥전단응력이 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 주수로와 홍수터의 주흐름방향 유속차에 의한 현상으로 주수로로부터 홍수터방향으로 운동량이 전달되는 것을 의미한다 (Rajaratnam과 Ahmadi, 1981). 접합부에 이르러서 바닥전단응력이 다시 감소하는 경향을 보이는데, 이것은 이차흐름에 의한 주흐름방향 유속의 감소로 바닥전단응력이 감소하기 때문이다.

5. 수치모형의 적용

Tominaga와 Nezu (1991)가 실험한 비대칭복단면 수로와 동일한 수로에 대해 주수로의 일부를 최심부 수로로 굴착하여 복복단면 수로를 형성하였다고 가정하였다. 복복단면 수로의 수리조건과 개념도를 각각 표 3과 그림 2에 나타내었다. 표 3과 그림 2에서 b_d 는 최심부 수로의 폭,

h_d 는 최심부 수로의 수심이다. 복복단면 수로에 적용된 격자수는 최심수로에서 y -방향으로 40개, z -방향으로 40개이며 주수로에서는 y -방향으로 40개, z -방향으로 32개 그리고 홍수터에서는 y -방향으로 80개, z -방향으로 16개이다. 해의 수렴까지 반복횟수는 약 12,000번이 소요되었다.

그림 5는 이차흐름을 나타내는 유속벡터도이다. 제1접합부와 제2접합부에서 이차흐름이 발생하는 것을 볼 수 있다. 제1접합부에서의 이차흐름이 제2접합부에서의 이차흐름보다 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 앞에서 언급했듯이 제1접합부와 제2접합부에서의 수심비가 다르기 때문인 것으로 보인다.

그림 6은 주흐름방향의 유속분포를 나타내고 있다. 흐름특성의 변화는 주수로와 홍수터가 만나는 제1접합부 그리고 주수로와 최심수로가 만나는 제2접합부에 존재한다. 제1접합부에서 등속선의 부편 형상이 제2접합부에서보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 제1접합부에서의 이차흐름이 제2접합부에서의 이차흐름보다 더 크게 발생한다는 것을 의미한다. Tominaga와 Nezu (1991)는 주수로 수심에 대한 홍수터 수심의 비에 따라 이차흐름의 특성이 변화된다는 것을 실험을 통해 밝힌 바 있다.

그림 8은 바닥전단응력의 분포를 나타낸 것이다. 바닥전단응력의 분포는 복단면 수로에서의 분포와 비교해 볼 때, 최심수로에서의 분포는 복단면 수로의 경우 주수로에서의 분포와 유사하며, 주수로와 홍수터에서의 분포는 복단면 수로의 경우 홍수터에서의 분포와 유사하다. 즉, 접합부와 벽면의 영향이 있는지의 여부가 바닥전단응력의 분포형태를 결정한다고 볼 수 있다. 또한 최심수로와 주수로가 만나는 제2접합부에서의 전단응력이 주수로와 홍수터가 만나는 제1접합부에서의 전단응력보다 큰 값을 갖는 것을 볼 수 있는데, 제1접합부와 제2접합부에서 이차흐름의 크기 차이 때문이다. 즉, 제1접합부에서의 이차흐름이 제2접합부에서의 이차흐름보다 크기 때문에 제1접합부에서 주흐름방향유속이 더 크게 감소된다. 따라서 주흐름방향유속이 작을수록 바닥전단응력이 작기 때문에 이러한 현상이 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 복복단면 수로에 대해 비선형 $k-\epsilon$ 모형을 사용하여 수치모의하였다. 수치모형의 검증을 위해 수치모의결과를 Tominaga와 Nezu (1991)의 실험자료와 비교하였다. 수치모의결과는 실험과 동일하게 이차흐름을 잘 모의하는 것으로 나타났으며 그에 따른 주흐름방향 유속 및 바닥전단응력을 잘 예측하는 것을 알 수 있었다. 최심수로의 접합부와 주수로의 접합부에서 다른 수심비 때문에 이차흐름 크기의 차이를 볼 수 있다. 제1접합부의 수심비가 제2접합부의 수심비보다 작기 때문에 제1접합부에서의 이차흐름이 제2접합부에서의 이차흐름보다 더 크게 나타났다. 이러한 이차흐름 크기의 차이는 유속분포, 바닥전단응력의 분포에 영향을 주는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구 되었음 (KRF-2001-041-E00527)

7. 참고문헌

- Launder, B.E. and Spalding, D.B. (1974). "The numerical computation of turbulent flow." *Computational Methods in Applied Mechanics*, 3, 269-289.
- Nisizima, S. and Yoshizawa, A. (1987). "Turbulent channel and Couette flows using an anisotropic $k-\epsilon$ model." *AIAA Journal*, 25(3), 414-420.
- Rajaratnam, N. and Ahmadi, R.M. (1981). "Hydraulic characteristics of compound channel flow." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 19(1), 43-60.
- Rubinstein, R. and Barton, J.M. (1990). "Nonlinear Reynolds stress models and the renormalization group." *Phys. Fluids A*, 2(8), 1472-1476.
- Shiono, K. and Lin, B. (1992). "Three dimensional numerical models for two stage open channel flows." *HYDROCOMP 92*, Vituki, Hungary, 123-130.
- Speziale, C.G. (1987). "On nonlinear $k-l$ and $k-\epsilon$ models of turbulence." *Journal of Fluid Mechanics*, 178, 459-475.
- Tominaga, A. and Nezu, I. (1991). "Turbulent structure in compound open-channel flows." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 117(1), 21-41.

표 1. 비선형 $k-\epsilon$ 모형의 모형상수

	$C_{\tau 1}$	$C_{\tau 2}$	$C_{\tau 3}$
Speziale (1987)	0.041	0.014	-0.014
Nisizima와 Yoshizawa (1987)	0.057	-0.167	-0.0067
Rubinstein과 Barton (1990)	0.034	0.104	-0.014

표 2. Tominaga와 Nezu (1991)의 S-2 실험조건

B (m)	b_f (m)	H (m)	h_f (m)	U_* (m/s)	U_m (m/s)	$Re \times 10^4$	Fr
0.40	0.20	0.08	0.04	0.0164	0.349	5.45	0.393

표 3. 복복단면 수로의 적용조건

B (m)	H (m)	b_f (m)	h_f (m)	b_d (m)	h_d (m)	U_* (m/s)	U_m (m/s)
0.40	0.10	0.20	0.04	0.10	0.02	0.0164	0.349

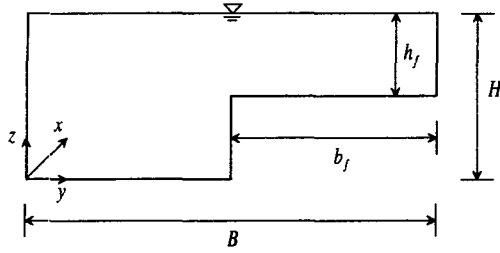


그림 1. 복단면 수로의 개념도

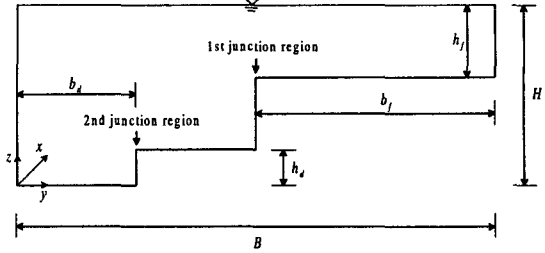
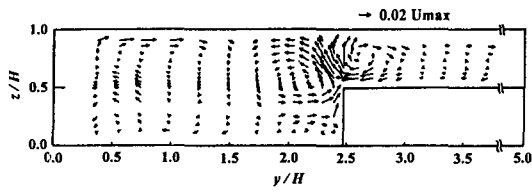
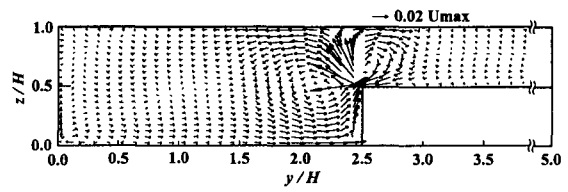


그림 2. 복복단면 수로의 개념도

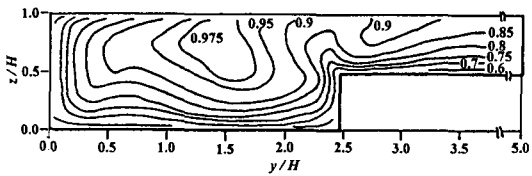


(a) Tominaga와 Nezu (1991)

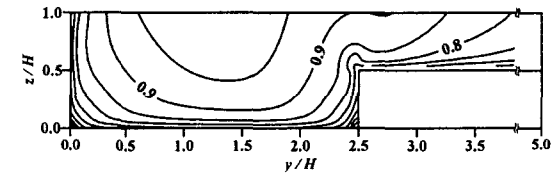


(b) 비선형 $k-\epsilon$ 모형

그림 3. 이차흐름 (복단면 수로)



(a) Tominaga와 Nezu (1991)



(b) 비선형 $k-\epsilon$ 모형

그림 4. 주흐름방향의 유속분포 (복단면 수로)

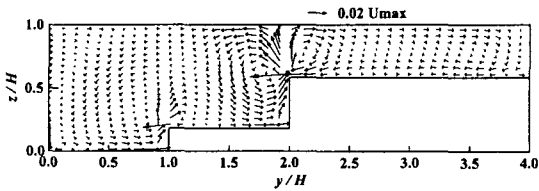


그림 5. 이차흐름 (복복단면 수로)

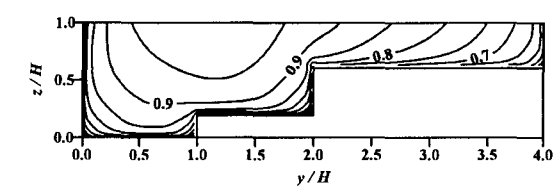


그림 6. 주흐름방향의 유속분포 (복복단면 수로)

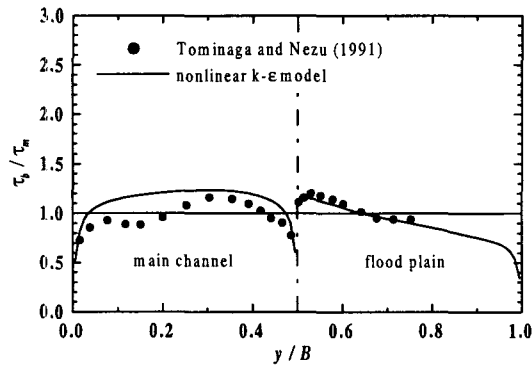


그림 7. 바닥전단응력 (복단면 수로)

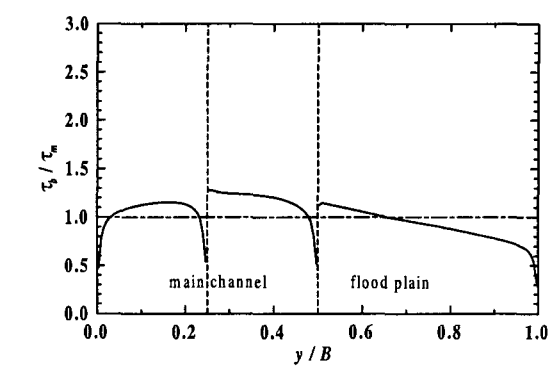


그림 8. 바닥전단응력 (복복단면 수로)