

**組·細粒床의 帶狀연속구조를 갖는 개수로 흐름의
부유사 농도 분포 수치모의**
Numerical Simulations of Suspended Sediment Concentration
in Open-Channel Flows over Smooth-Rough Bed Strips

최성욱* · 박문형** · 강형식***
Sung-Uk Choi · Moonhyeong Park · Hyeongsik Kang

요 지

組·細粒床의 帶狀연속구조를 갖는 개수로 흐름의 부유사 농도분포를 수치모의 하였다. 흐름의 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식은 레이놀즈응력모형을 이용하여 해석되었으며, 와점성계수 개념을 이용하여 부유사 수송 방정식을 해석하였다. 기존의 실험결과와 비교하여 모형의 검증은 실시하였으며, 동일한 흐름에 대하여 부유사 농도 분포를 계산하였다. 부유사량의 계산 결과 매끈한 하상 위의 노도분포가 거친하상 위 보다 크게 나타났다. 또한 수치모의로부터 산정된 와확산계수를 Wang and Cheng(2005)이 제안한 해석적 방법과 비교하였다.

핵심용어 : 組·細粒床의 帶狀연속구조, 개수로 흐름, 부유사 농도분포, 레이놀즈 응력 모형

1. 서 론

일반적으로 매끄러운 하상을 갖는 개수로 흐름에서는 수심과 폭의 비(aspect ratio: AR)가 5-6이상인 광폭 수로의 중앙부분에서 이차 흐름이 발생하지 않는 것으로 알려져 있다. 그러나 이동상의 개수로 흐름에서는 수로의 중앙부분에서 이차 흐름이 존재하는 것이 현장 관측 및 실험을 통하여 관찰되어 왔다. 그림 1은 組·細粒床의 帶狀연속구조를 갖는 개수로 흐름에서 발생하는 이차 흐름의 모식도이다. 그림에서 나타난 것과 같이 매끈한 하상과 거친 하상에서 각각 상향류와 하향류가 발생하여 이차류가 형성되는데 이러한 흐름을 cellular secondary current라고 한다. Nezu와 Nakagawa(1984)는 이동상의 측벽과 바다 부근의 경계에서 발생하는 corner vortex가 횡방향으로 발달하면서 cellular secondary current가 발생한다고 추론한 바 있다. Colombini(1993)는 대수응력모형을 이용한 안정성 해석을 통하여 cellular secondary currents의 초기 형성은 corner vortex에 기인하지만 이동상 자체의 불안정성이 더 큰 영향을 미친다고 밝힌바 있다. 세포형태의 이차흐름은 하천의 3차원적인 하상형상과 유사 이송을 결정하기 때문에 공학적으로 중요한 의미를 갖는다. 그러나 수치해석 및 실험의 어려움 때문에 현재까지 수행된 연구는 얼마 되지 않는다.

본 연구에서는 組·細粒床의 帶狀연속구조를 갖는 개수로 흐름의 부유사 농도분포를 수치모의 하고자 한다. 흐름의 지배 방정식인 Navier-Stokes 방정식은 레이놀즈 응력 모형을 이용하여 해석하였으며 와점성계수 개념을 이용하여 부유사 수송 방정식을 해석하였다. 흐름 모형에 대하여 Wang과 Cheng (2005)의 실험결과와 비교하여 검증하였으며, 동일한 흐름 조건에 대하여 수치모의 결과를 이용하여 組·細粒床의 帶狀연속구조를 갖는 개수로 흐름에서의 부유사 농도 분포의 특징을 연구하였다.

* 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 (E-mail: schoi@yonsei.ac.kr)
** 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 (E-mail: liege@yonsei.ac.kr)
*** 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사후연구원 (E-mail: kanghs@yonsei.ac.kr)

2. 수치 모형의 구성

2.1 지배방정식

레이놀즈수가 충분히 크고, 흐름이 등류상태일 경우 Navier-Stokes 방정식을 시간 평균하여 유도된 연속 방정식 및 운동량 방정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} - \overline{u_i' u_j'} \right) + g_i \quad (2)$$

여기서 \bar{u}_i 는 i -방향으로의 평균유속, ρ 는 유체의 밀도, \bar{p} 는 시간평균된 압력, ν 는 유체 동점성계수, $-\overline{u_i' u_j'}$ 는 레이놀즈응력, g 는 중력가속도, 그리고 s_0 는 바닥경사이다. 식(2)의 운동량방정식에서 레이놀즈 응력의 계산을 위해 6개의 편미분 방정식으로 구성된 레이놀즈응력의 수송방정식을 해석하였다. 레이놀즈 응력의 수송방정식에 포함되어 있는 난류의 확산항, 소산률항, 그리고 압력-변형을 상관항 등은 모델링이 필요한 항이다. 본 연구에서는 강형식과 최성욱(2002)의 연구결과에 따라 난류의 확산항을 위해 Mellor와 Herring(1973) 모형, 소산률 항에는 Hanjalic과 Launder(1972) 모형, 압력-변형을 상관항에는 Speziale 등 (1991)의 모형을 사용하였다. 지배방정식을 유한체적법(finite volume method)에 의해 수치해석 하였다. 또한 Power-Law 기법을 이용하여 지배방정식을 이산화하였으며, 압력장 모의를 위해 SIMPLER 방법을 적용하였다. 벽 경계조건은 일반성을 갖는 경험공식인 벽 법칙(law of the wall)을 사용하였으며, 자유수면의 경계조건은 난류운동에너지의 소산률을 제외한 모든 변수에 대하여 대칭평면조건을 적용하였으며, 난류운동에너지의 소산률에 대해서는 Hossain과 Rodi(1980)가 제시한 자유수면 경계조건을 이용하였다.

2.2 부유사 수송방정식

부유사 농도 분포는 다음과 같은 부유사 수송방정식을 이용하여 해석하였다.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\bar{u}_j - w_s \delta_{j3}) \bar{c} \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

여기서 \bar{c} 는 시간 평균된 부유사 농도, w_s 는 유사입자의 침강속도, ν_t 는 와점성계수, 그리고 σ_c 는 Schmidt 수로서 1.0을 이용하였다. w_s 는 Dietrich(1982)가 제안한 식을 이용하였다.

3. 모형의 검증

수치모형의 검증을 위하여 Wang과 Cheng(2005)의 실험조건을 이용하였다. 이들의 실험조건은 수심 0.075 m, 수로폭 0.6 m로서 수심에 대한 수로폭의 비 $AR = 8.0$ 이고, 횡방향으로 0.075 m의 거친 하상 매끈한 하상이 연속적으로 분포하는 개수로이다. 그리고 거친 하상에서 유사의 중앙입경은 2.55 mm이다.

그림2는 단면에 대한 주흐름방향의 평균유속 분포도이다. 유속은 개수로 중앙의 수심평균 유속으로 무차원되었다. 계산된 결과가 Wang과 Chen(2005)의 실험결과를 비교적 잘 모의하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 실험 결과와 비교하여 볼 때 계산된 결과의 velocity dip 현상이 다소 약하게 발생하고 있다. 이러한 결과는 수치모의가 자유수면 부근의 이차류를 다소 과소 산정한 결과로 보이는데, 자유수면의 진동을 수치모의에서 반영하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

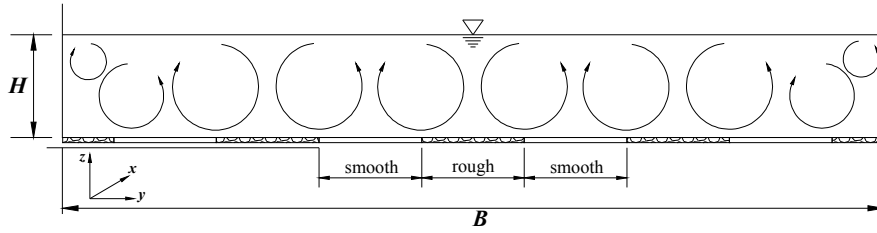
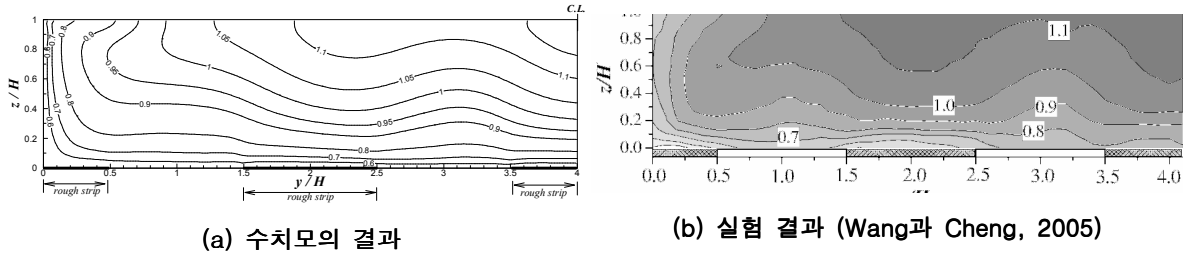


그림 1. 組·細粒床의 帶狀연속구조를 갖는 개수로 흐름의 Cellular Secondary Currents



(a) 수치모의 결과

(b) 실험 결과 (Wang과 Cheng, 2005)

그림 2. 주흐름 방향 평균 유속 분포

4. 부유사 농도분포

組·細粒床의 帶狀연속구조를 갖는 개수로 흐름에 대하여 부유사 농도분포를 수치모의 하였다. 흐름과 부유사 농도가 상호 영향을 주지만 본 연구에서는 이러한 영향을 배제 하였다. 즉 즉 식(1), (2)로부터 계산된 흐름을 이용하여 부유사 수송방정식을 해석하였다. 그리고 바닥 유사의 부상 및 부유사의 침강에 의한 하상 변동 역시 무시하였다. 부유사 수송방정식의 자유수면 및 측벽에서의 경계조건으로는 흐름울이 0이라고 설정하였다. 바닥의 경계조건으로 매끈한 하상과 거친 하상에 대하여 각각 Garcia와 Parker(1991)가 제안한 평형 상태 농도식과 흐름울 0을 부여하였다. 수치모의에서 부유사는 80 μ 의 단일 입경을 갖는 것으로 가정하였으며, Wang과 Chen (2005)의 실험 조건에서 매끈한 하상의 조도높이 k_s 를 0 μ 에서 80 μ 으로 변경하였다.

그림3은 부유사 농도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 매끈한 하상 위의 부유사 농도가 거친 하상의 부유사 농도보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 거친 하상의 전단응력이 매끈한 하상보다 커지만 바닥의 입자가 크기 때문에 유입되지 않기 때문이다. 그리고 매끈한 하상 위의 농도분포가 자유수면 쪽으로 편이되는 것을 확인할 수 있는데 이러한 양상은 組·細粒床의 帶狀연속구조를 갖는 개수로 흐름에서 발생하는 cellular secondary currents의 영향인 것으로 판단된다.

그림4는 외확산계수의 수심 방향 분포를 나타낸 것으로서 RSM으로 계산된 외확산계수와 Wang and Cheng(2005)이 제안한 해석적 모형에 의한 결과를 함께 나타내었다. RAM에 의한 결과는 다음의 식을 이용하여 산정하였다.

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

여기서 C_μ 는 0.09이다. Wang and Cheng(2005)은 주흐름방향 평균유속과 레이놀즈 응력을 이용한 관계식을 제안한 바 있다. 그림에서 $z/H < 0.5$ 구간에서는 두 방법에 의한 결과가 유사하게 나타나고 있으며, $z/H > 0.5$ 구간에서는 수치모의에 의한 결과가 해석적 방법에 의한 결과보다 크게 산정되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 내부영역($z/H < 0.2$)의 구간에서는 거친 하상 위에서의 외확산계수가 크게 나타나고 있는데 이러한 양상은 거친 하상의 전단속도가 크기 때문이다. 그러나 외부영역($z/H > 0.2$)에서는 반대의 양상이 나타나는데, 이것은 매끈한 하상 위에서 발생하는 상향류가 바닥부근의 강한 난류를 자유수면 쪽으로 전달하며 거친 하상 위에서 발생하는 하향류가 자유수면 부근의 약한 난류를 바닥 쪽으로 전달하기 때문인 것으로 판단된다.

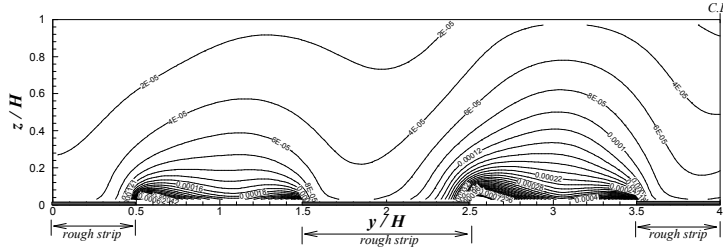


그림 3. 부유사 농도분포

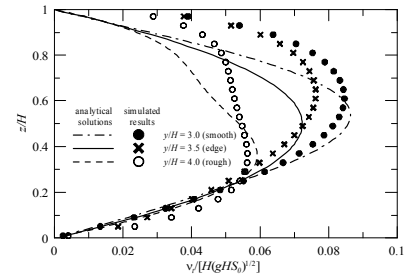


그림 4. 와점성 계수

5. 결론

본 연구에서는 粗·細粒床의 帶狀연속구조를 갖는 개수로 흐름과 부유사 농도 분포를 수치모의 하였다. 레이놀즈응력모형을 이용하여 Navier-Stokes 을 해석하였다. 제안한 모형을 Wang and Cheng (2005)의 실험결과를 이용하여 제안한 모형을 검증하였다. 계산된 결과는 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그리고 제안한 모형을 이용하여 부유사 농도분포를 예측하였다. 매끈한 하상 위의 부유사 농도분포가 거친 하상보다 크게 나타났는데, 이러한 양상은 Kinoshita(1967) 현장 측정 결과와 유사한 것이다. 마지막으로 수치모의에 의하여 계산된 와확산계수를 해석적 방법에 의한 결과와 비교하였는데 비교적 유사한 결과가 나타났다.

참고문헌

1. 강형식, 최성욱 (2002). "개수로 흐름에서 레이놀즈응력모형의 비교." 대한토목학회논문집, 22(1-B), 21-32.
2. Colombini, M. (1993). "Turbulence-driven secondary flows and formation of sand ridges." *Journal of Fluid Mechanics*, 254, 701-719.
3. Dietrich, W.E. (1982). "Settling velocity of natural particles." *Water Resource Research*, AGU, 18(6), 1615-1626
4. Garcia, M. and Parker, G.. (1991). "Entrainment of bed sediment into suspension." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 117(4), 414-435.
5. 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.
6. Hossain, M.S. and Rodi, W. (1980). "Mathematical modeling of vertical mixing in stratified channel flow." *Proceedings of the 2nd Symposium on Stratified Flows*.
7. Kinoshita, R. (1967). "An analysis of the movement of flood waters by aerial photography; concerning characteristics of turbulence and surface flow." *Photographic Surveying*, 6, 1-17 (in Japanese).
8. Mellor, G.L. and Herring, H.J. (1973). "A survey of mean turbulent field closure." *AIAA Journal*, 11, 590-599.
9. Nezu, I. and Nakagawa, H. (1984). "Cellular secondary currents in straight conduit." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110(2), 173-193.
10. Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*. IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
11. 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.
12. Wang, Z.-Q. And Cheng, N.-S. (2005). "Secondary flows over artificial bed strips." *Advances in Water Resources*, 28, 441-450.