

사행 자연수로에서의 3차원 흐름 모의

3D Flow Simulation in the Meandering Natural Channel

손민우*, 백경오**, 김상욱***

Minwoo Son, Kyoung Oh Baek, Sang Ug Kim

Abstract

In a natural river, cross sections of a channel vary according to inner or outer parts of meandering. Generally, depth of outer parts is deeper than that of inner parts. This kind of cross section change by meandering can be demonstrated by Beta distribution. The objects of this research is a 3D simulation of primary and secondary flow in the meandering natural channel. FLOW-3D program, a numerical model using CFD technique, and LES method was used for this research.

3D simulations were conducted in the channels having Beta distribution cross sections which have beds of mortar, gravel and vegetation. Two types of water stages and discharge were applied to each channel. In this research, primary flows are located in the outer parts of a top of bend and secondary flows rotate in the bottom on outer parts.

Key words : Beta Distribution, Primary Flow, Secondary Flow, CFD, LES

요 지

실제 자연하천은 사행의 외측과 내측에 따라서 하도의 단면형이 변화한다. 일반적으로 만곡부의 외측은 수심이 깊어지고, 내측은 얇게 된다. 사행에 따른 이러한 단면의 횡단적 변화는 베타분포에 의해서 설명될 수 있다. 본 연구의 흐름 모의는 주흐름과 이차류의 양상을 살피는 것을 주목적으로 하여, 3차원 수치모의 되었다. 흐름의 3차원 모의는 범용 프로그램인 FLOW-3D 모형을 이용하여 이루어졌으며, LES 방법을 사용하였다.

베타 분포를 이용한 자연수로의 횡단형에 모르타르, 자갈, 식생 등으로 하상이 피복되어 있는 상태를 가정하여 조고를 대입하고, 유량과 수위가 다른 조건에서 3차원 흐름모의를 실시하고, 그 결과를 이용하여 수로내의 주흐름도, 이차류의 형태 등을 정량적으로 분석하였다. 분석 결과, 수로에서의 주흐름은 만곡부의 정점을 약간 지난 지점에서 가장 만곡부 외측으로 치우치는 특성을 확인할 수 있었다. 이차류의 경우에는 흐름이 만곡부 외측 하상 근처에서 회전하고, 이 부근에서의 유속이 가장 큰 값을 나타냄을 확인할 수 있었다. 이를 통해 하상 및 저수호안의 재료가 만곡부 외측에서 침식되어 만곡부 내측에서 퇴적되는 현상을 이해할 수 있을 것으로 생각된다.

핵심용어 : 베타분포, 이차류, LES, 주흐름, 사행 자연수로, 조고

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 · E-mail : minwooson@gmail.com
** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 · E-mail : kopaek1@kict.re.kr
*** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 · E-mail : sukim@kict.re.kr

1. 서론 및 이론적 배경

하천의 평면, 종단 변화에 따라 횡단형이 변화하는 자연하천에서의 흐름해석은 유사의 이동, 오염물의 확산, 하천형태의 변화 등을 예측하는 과정에서 필수적인 요소이다. 1차원, 2차원 흐름해석으로는 주흐름에 수직한 횡단면에서의 이차류를 확인할 수 없는 단점이 있지만 3차원으로 흐름을 모의하면 이에 대한 해석과 분석이 가능하다.

FLOW-3D는 CFD 방법을 이용한 범용 유체역학 프로그램으로, 비정상 유동 상태에서의 연속 방정식(식 (1))과 3차원 운동량 보존 방정식(식 (2), Navier-Stokes Equation)을 이용하여 해석한다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{RSOR}{\rho} \quad (1)$$

여기서 A_x , A_y , A_z 는 흐름면적의 비, ρ 는 밀도, $RSOR$ 은 질량 생성/소멸 항이다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f}(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + uA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x - \frac{RSOR}{\rho V_f} u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f}(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + uA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y - \frac{RSOR}{\rho V_f} v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f}(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + uA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + F_z - \frac{RSOR}{\rho V_f} w \end{aligned} \quad (2)$$

3차원 모의를 위해서는 비정규성, 임의성 등의 특징을 가지는 난류 현상에 대한 해석이 필요하다. Navier-Stokes 방정식을 직접 풀이하는 것이 DNS인 것에 비해, LES는 기초방정식에 공간적인 평균화 조작을 행하고, 유동장을 격자로 해상할 수 있는 성분과 그 이하의 작은 성분으로 분리하여 전자는 직접 계산하고 후자는 모델화를 하는 특성을 가진다(한국건설기술연구원, 2005). 격자가 충분히 작은 것이라면 격자 이하의 난류 구조는 등방적이라고 간주할 수 있어 보편적인 모형을 구성하기 쉬운 특징을 갖고 있다. LES에서는 시간평균을 이용하지 않기 때문에 시간변동이 빠른 비정상 유동에의 응용도 가능하게 된다.

2. 적용수로 및 모의조건

모의수로의 단면은 Almquist와 Holley(1985)가 제안한 방법과 Seo와 Baek(2004)에 의해 제안된 확률밀도함수의 하나인 베타 분포를 이용한 자연하천의 수심 및 유속의 횡분포를 묘사하는 방법으로 구성되었다. Almquist와 Holley에 따르면 최심선이 가장 수로 바깥 쪽으로 접근할 때 수로의 바깥으로부터 폭의 20% 지점에 이르게 되고, 이때, 최대수심과 횡방향 위치의 관계는 h_T/h 가 1.6이 되는 특성을 가진다. 또한 최심선이 하폭의 중앙에 위치할 때, 최대수심과 횡방향 위치의 관계는 h_T/h 가 1.2가 된다고 발표하였다. 베타 분포의 범위는 0에서 1이고 최대값을 특정점에 배정할 수 있는 장점을 가지고 있으며 분포식은 식 (3)과 같다.

$$f(y) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} y^{\alpha-1}(1-y)^{\beta-1}, \quad (0 < y < 1) \quad (3)$$

본 연구에서 모의한 수로는 사행도 1.32, 곡률반경 대 하폭의 비 2.4, 중심각 120°, 사행과장 대 하폭의 비 9.7, 사행과장 대 곡률반경의 비 4의 사행 자연수로로 다양한 조고(roughness height)를 대입하여 흐름을 모의하였다. 그림 1은 모의수로의 평면형과 횡단형을 나타낸다. 수로의 폭은 1 m이며, 직선연장은 15 m이다.

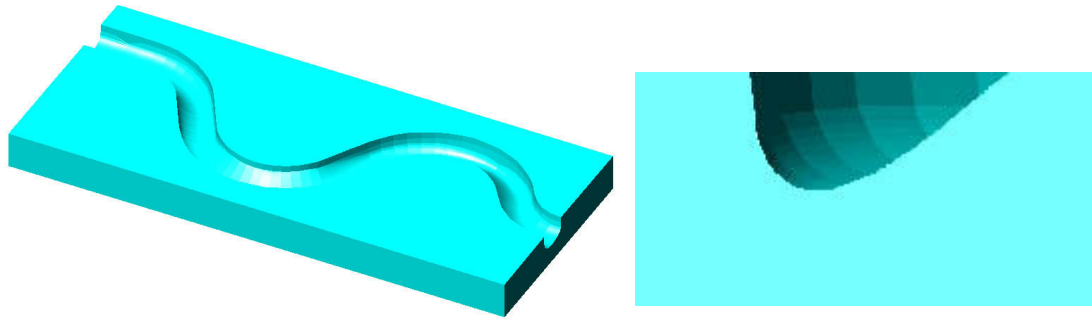


그림 1. 모의수로 평면형 및 횡단형

모의에 적용된 실험조건은 단면평균수심 20 cm에 $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 유량과 단면평균수심 30 cm에 $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 유량이다. 조고는 자갈하상, 모르타르하상, 식생하상을 가정하여 각각 3 cm, 0.8 mm, 10 cm를 대입하였다.

3. 모의결과

그림 2 ~ 7은 각 모의조건에 나타난 수표면에서의 주흐름과 첫 번째 만곡부 정점에서 이차류의 양상을 나타내었다. 주흐름에 대한 도시 결과에서 알 수 있듯이, 가장 빠른 유속이 만곡부 외측을 따라 발생한다. 유하되는 유량이 증가함에 따라 주흐름은 더욱 명확한 형태를 나타내고, 조고가 감소할수록 유속이 증대되어, 보다 선명한 주흐름 경로를 확인할 수 있다. 이차류는 수표면 부근에서 만곡부 내측에서 외측으로의 흐름이 존재하고, 하상 근처에서는 외측으로부터 내측으로의 흐름이 발생한다. 또한 만곡부 외측의 수위가 내측에 비해 약간 상승하는 편수위 현상도 관찰할 수 있다. 동일한 유량과 유속이 유하되는 경우, 조고에 따른 이차류 양상의 변화는 크지 않은 것으로 판단된다. 만곡부 내측의 하상은 유속이 가장 느릴 뿐 아니라 하상에서 수표면 방향으로 이차류가 발생하여 만곡부 내측 하안으로 토사를 이동시키면서 퇴적될 것으로 예상된다. 이에 비해 만곡부 외측 하상은 이차류의 크기가 크고, 수표면에서 하상으로 흐름이 발생하여 하안부의 토사를 침식시킨 뒤 하상으로 이동시키는 것으로 사료된다.

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 사행에 따라 단면이 변화하는 사행수로를 가정하고, 상용 프로그램인 FLOW-3D를 이용하여 3차원 흐름 모의를 수행하였다. 또한 가상 사행수로의 하상이 모르타르, 자갈, 식생으로 피복되었다는 가정하에 각각의 상태에 적합한 조고를 입력하여 흐름 모의를 수행하였다. 그 결과 주흐름의 최대 유속은 만곡의 외측을 따라 발생함을 알 수 있었다. 그리고 만곡의 정점부에서의 이차류는 전형적인 회전류 형태를 띠었다. 조고에 따른 흐름변화를 살펴보면, 주흐름 및 이차류의 크기는 조고에 민감하게 반응하나, 그 형태는 그다지 민감하지 않았다. 그러나 Demuren 와 Rodi(1986)에 의하면 조도에 의해 이차류의 양상이 상이하게 나타남을 수치모의를 통해 주장한 바 있다. 따라서 향후 연구에서는 조고에 따른 흐름 양상의 민감도를 엄밀히 분석할 필요가 있으며, 실험실 실험 및 현장에서 실측된 유속자료를 토대로 모형의 매개변수인 조고를 검증 및 검증해야 할 것이다.

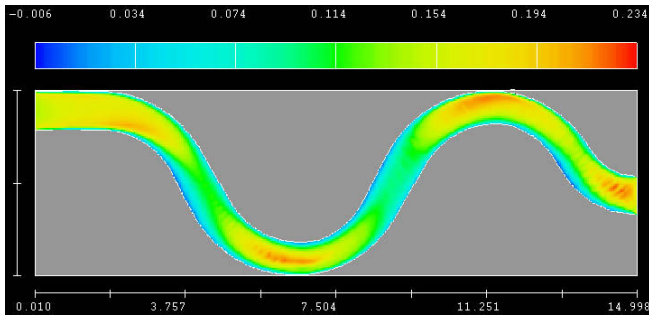


그림 2. 0.03 m³/s 유량 유하시 자갈하상의 흐름특성

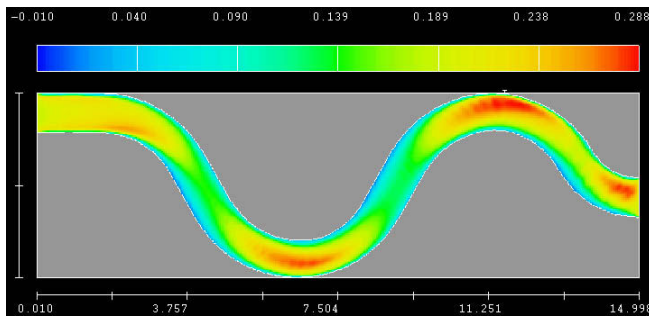


그림 3. 0.06m³/s 유량 유하시 자갈하상의 흐름특성

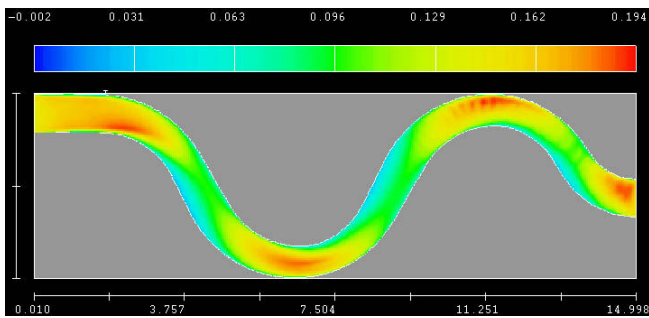


그림 4. 0.03 m³/s 유량 유하시 모르타르하상의 흐름특성

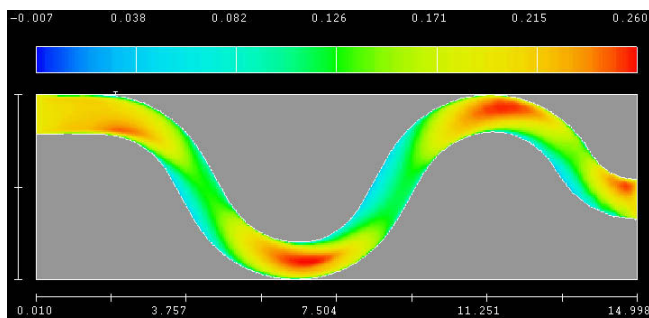


그림 5. 0.06 m³/s 유량 유하시 모르타르하상의 흐름특성

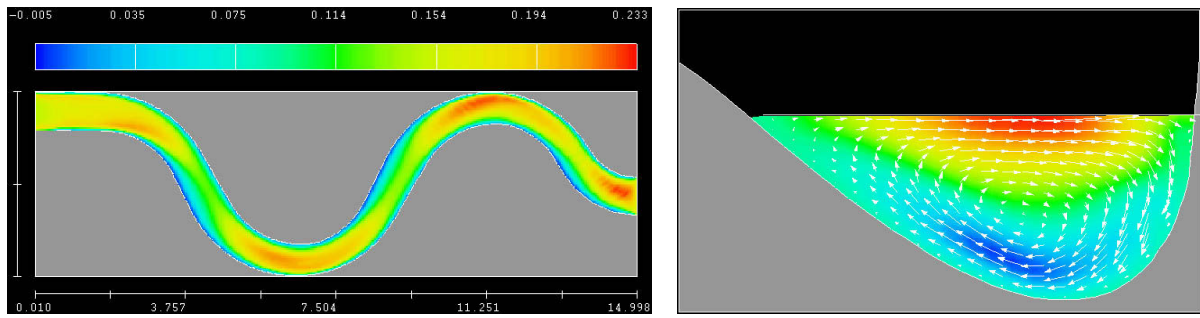


그림 6. 0.03 m³/s 유량 유하시 식생하상의 흐름특성

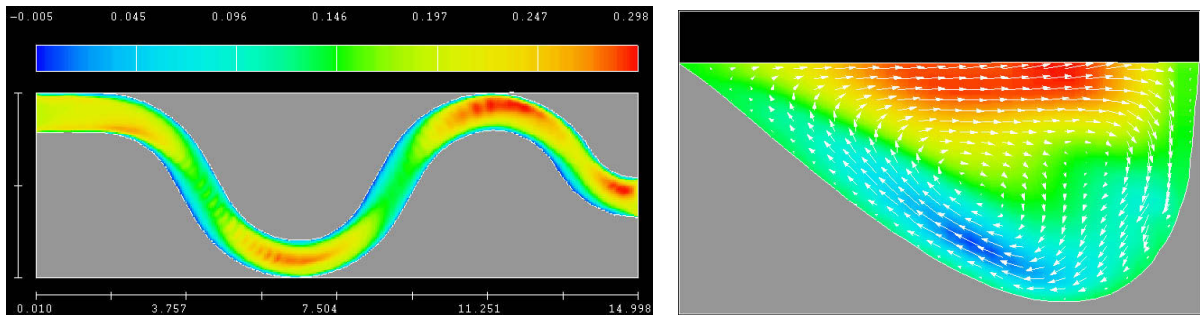


그림 7. 0.06 m³/s 유량 유하시 식생하상의 흐름특성

참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원(2005). 다기능 하천실험사업, 한국건설기술연구원.
2. Almquist, C.W. and Holley, E.R.(1985). "Transverse Mixing in Meandering Laboratory Channels with Rectangular and Naturally Varying Cross Sections", *Technical Report CRWR-205*, Univ. of Texas, Austin, Texas.
3. Demuren, A. O., and Rodi, W. (1986). "Calculation of flow and pollutant dispersion in meandering channels." *J. of Fluid Mech.*, 172, 63-92.
4. Seo, I.W. and Baek, K.O.(2004). "Estimation of the Longitudinal Dispersion Coefficient Using the Velocity Profile in Natural Streams", *J. of Hydr. Engrg.*, ASCE, 130(3), 227-236.