

3차원 수치모의를 이용한 복단면 사행수로의 흐름 특성 분석

Analysis of Flow Characteristics in the Meandering Compound Channel Using 3D Numerical Simulation

김명환*, 이두한**, 조원철***

Myounghwan Kim, Du Han Lee, Woncheol Cho

요 지

본 연구에서는 복단면 사행수로의 흐름특성과 수위특성을 정량적으로 분석하고자 코사인 유도형(cosine-generated) 복단면 만곡수로 실험 자료를 기초로 3차원 수치모의를 수행하였다. 수치모의에는 3차원 수치모의 프로그램인 Flow3D를 사용하였고, 난류 모델은 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용 하였다. 수치모의 결과는 실험 결과와의 비교를 통하여 평면유속분포 및 유속벡터, 만곡부 단면에서의 수위분포 등으로 분석하였고, 이는 이전의 실험결과와 일치하는 것으로 나타난다. 특히, 평면 유속분포는 수위 증가에 따라 저수로 중심의 최대 유속선이 만곡 내측으로 이동하는 것이 모의되었다. 이런 흐름구조는 다른 연구자들이 이전까지 연구한 실험 및 수치모의 결과와도 일치한다. 또한, 수위 분포 결과에서는 사행하도의 원심력에 의한 흐름특성인 만곡부 내측과 외측의 수위차가 미세하게 발견되었다.

핵심용어 : 복단면 사행수로, 만곡부, 수치모의, 홍수터, 최대유속선

1. 서 론

복단면 사행하도는 저수로와 홍수터의 경계 흐름에 의한 강한 전단력에 의해 특징지어지는 복단면 하도의 흐름 특성과 원심력에 근거한 강한 회전류에 의해 특징지어지는 사행하도의 흐름특성이 서로 얽혀 복잡한 양상을 보인다. 현재 이러한 복단면 사행하도의 흐름 특성을 규명하기 위하여 많은 연구자들이 다양한 이론적 모델을 바탕으로 수리실험과 수치모의 등을 통한 연구를 수행하고 있으며, 그에 따른 연구 성과들도 꾸준히 누적되고 있다.

복단면 사행하도는 저수로와 제방의 위상 관계에 따라 MS형 사행하도(MS-Meandering Channel with Straight Floodwall)와 MM형 사행하도(MM-Meandering Channel with Meandering Floodwall)로 구분할 수 있다. MS형과 MM형 하도의 대표적인 차이는 전단응력의 분포에서 찾아볼 수 있는데, 수심이 증가하면서 MS형 복단면 하도에서는 저수로와 홍수터가 교차하는 변곡부 주변을 비롯한 저수로의 중심에서 큰 전단응력 분포를 보이는 반면 MM형 하도에서는 만곡부 내측에서 정점부로 접근하면서 최대 전단응력이 나타남으로써 유속 분포와 유사한 특성을 보인다. 본 연구에서는 RNG(Renormalized Group) $k-\epsilon$ 모델을 이용하여 2회 사행하는 MM형의 복단면 사행수로를 실험과 동일한 조건으로 3차원 수치모의 하였다. 그리고 모의 결과를 이용하여 평면유속분포와 수위차 등의 결과를 실험값과 비교, 분석하였다.

* 정회원 · 한국건설기술연구원 연구원 · E-mail : narrowgate@kict.re.kr
** 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원 · E-mail : dhlee@kict.re.kr
*** 정회원 · 연세대학교 토목공학과 교수 · E-mail : woncheol@yonsei.ac.kr

2. 기본 이론

Flow3D는 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes)가 가능한 3차원 수치모의 프로그램으로, 수치기법으로 유한체적법(FVM, Finite Volume Method)을 사용하며, VOF(Volume of Fluid) 방정식에 의해 자유수면 해석이 가능한 프로그램이다.

이번 Flow3D를 이용한 수치모의에서 난류모델은 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 이 모델은 $k-\epsilon$ 모델에서 작은 크기의 난류 운동을 가지는 유체의 움직임을 제거하고, 그 유체가 큰 크기의 유체 움직임과 점성에 미치는 영향을 계수조정과 수정된 점성력을 사용하여 표현하는 모델이다. $k-\epsilon$ 모델에 비하여 계산 시간이 길지만 저 Reynolds 수와 고 전단 흐름인 경우에 적합하다고 알려져 있으며, 방정식은 $k-\epsilon$ 모델과 유사하다. RNG $k-\epsilon$ 모델의 난류 에너지 k 의 수송방정식과 소산율 ϵ 에 이용되는 수송 방정식은 다음과 같다.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \rho u_i u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P - c_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} - R \quad (2)$$

R (변형률)은 $k-\epsilon$ 모델에는 없는 추가 항이다.

$$R = \frac{c_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

여기서, $c_\mu=0.0845$, $\eta = \sqrt{P}k/\epsilon$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$, $c_{1\epsilon} = 1.42$, $c_{2\epsilon} = 1.68$, $\sigma_k = \sigma_\epsilon = 0.7194$ 이다.

3. 수치모의

본 연구에서는 수치모의의 비교와 검증을 위해 이두한 등(2005)의 복단면 사행수로 수리모형실험 결과를 사용하였다. 실험에 사용된 수로는 사행도 1.8의 코사인-유도 곡선을 중심선으로 가지는 하폭 4m(저수로 1m, 홍수터 좌우안 각 1.5m) 총 연장 35.6 m의 복단면 사행수로이다. 수로의 지오메트리는 3차원 CAD 프로그램인 Solide Edge를 이용하여 실험수로와 동일축적, 동일형상으로 설계하였고, 조도는 Chow의 roughness height k 를 SI 단위로 변환하여 사용하였다(Chow, 1959). 수치모의의 수리조건은 총 4개이며, 자세한 내용은 표 1과 같다.

표 1 케이스별 수치모의 조건

케이스	설명	수심평균단면적(m ²)	평균단면유속(m/s)	유량(cms)
case1	저수로 수심 0.25m	0.4	0.25	0.10
case2	저수로 수심 0.30m	0.6	0.25	0.15
case3	저수로 수심 0.35m	0.8	0.25	0.20
case4	저수로 수심 0.40m	1.0	0.25	0.25

4. 모의결과의 비교 및 분석

그림 1은 실험과 수치모의의 4개 case 중 대표적인 흐름 특성을 가지는 case1, case4의 0.6d의 유속 분포와 벡터를 비교한 것이다. 홍수터 수심이 깊지 않은 case1의 경우 홍수터에서의 흐름은 사행수로의 기하학적 영향 보다는 홍수터 바닥의 전단력에 더 큰 영향을 받는다. 그로 인해 최대 유속은 수심이 깊은 저수로를 중심으로 발달하는데, 실험과 수치모의 모두 이와 유사한 형태의 흐름분포를 보였다. 또한 최대 유속에서도 실험과 수치모의 모두 약 0.3m/s 로 유사한 값을 나타냈다. 단, 실험에서는 변곡부 우안 홍수터에서 평면상의 역류역이 발견되었지만 수치모의에서는 모의되지 않았다. case4는 깊은 홍수심의 유속분포를 측정된 것으로 실험결과와 수치모의 결과 모두 변곡부 우안의 와류는 발견되지 않는다. 평면유속분포에서 실험과 수치모의 모두 두 번째 만곡부에서 최대 유속이 나타난다. 이는 첫 번째 만곡부 내측으로 발달하여 가속된 유속이 짧은 변곡부에서 단면전체에 분산되지 못하고 바로 두 번째 만곡부 내측에 도달하여 발생하는 현상으로 판단된다. 이런 흐름 패턴은 모든 case에서 나타나며, 이러한 결과는 서일원 등(2006)의 단단면 사행수로 실험 결과에서도 기술된 바 있다.

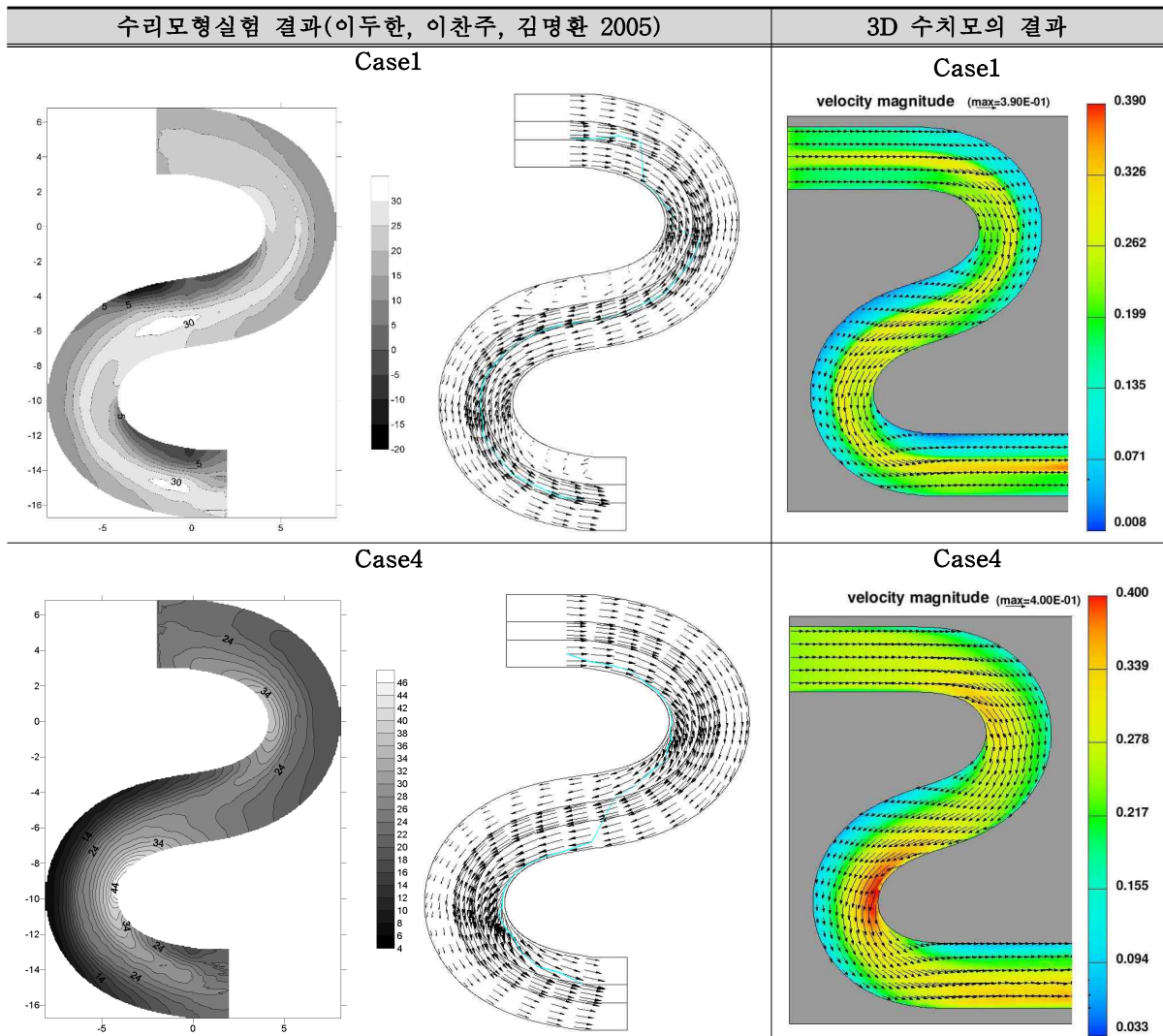


그림 1 평면유속분포와 벡터

표 2는 만곡부 정점의 수위 값을 각 case 별 기준수위로 나눈 상대수위 값을 비교한 것이다. 수치모의 결과 모든 case의 실험에서 모두 단면 좌우안의 수위 차가 모의되었다. 그러나 그 값은 0.018-0.026으로 매우 작은 값이다. 수로 폭을 고려한다면 이는 1/200-1/320에 해당하는 미세한 경사로 super elevation이 나타난다. 그리고, 첫 번째 만곡부에서 보다 두 번째 만곡부에서 더 큰 수위차가 나타났는데, 이러한 현상은 첫 번째 만곡부 보다 두 번째 만곡부에서 유속과 유속 차가 더 크게 모의되었던 평면유속분포 결과와 상응하는 결과이다.

표 2 만곡정점에서의 상대수위 차

만곡부	구분	case1	case2	case3	case4
1st band apex	상대수위 최대값	1.048	1.038	1.028	1.024
	상대수위 최소값	1.024	1.015	1.008	1.006
	상대수위 차	0.024	0.023	0.020	0.018
2nd band apex	상대수위 최대값	1.032	1.024	1.019	1.017
	상대수위 최소값	1.006	1.000	0.994	0.996
	상대수위 차	0.026	0.024	0.025	0.021

5. 결 론

본 연구에서는 저수로와 홍수터가 동시에 사행하는 MM형 수로의 흐름 특성을 파악하기 위해 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 3차원 수치모의를 하였다. 그리고 수치모의 결과와 실험 결과를 비교하여 다음과 같은 결과를 도출 하였다.

1. 평면 흐름 패턴의 경우 실험과 유사한 결과를 보였다. 최대 유속은 저수심의 흐름에서 저수로 중심을 발달하다가 수심이 깊어지면서 만곡부 내측을 따라 발달하는 패턴으로 변화하였다. 그러나 실험에서 발견되었던 역류역은 수치모의에서는 모의되지 않았다.

2. 만곡 정점 단면에서의 수위 차는 모든 case에서 모의되었고, 그 값은 실험에서 측정하기 어려운 미세한 값이었다. 수위 차는 첫 번째 만곡부보다 두 번째 만곡부에서 더 크게 모의되었는데, 수치모의와 실험은 모두 정상등류 조건이므로 이러한 결과는 만곡 내측으로 최대 유속이 발생하는 것과 수위 차 사이에 일정한 관계가 성립됨을 보여준다. 따라서 향후 복단면 사행 수로에 관한 실험 및 수치 모의 결과를 지속적으로 누적한다면, 하폭과 사행도에 따른 만곡 내측 단면 유속과 단면 수위 차 사이의 관계를 경험식의 형태로 정리할 수 있을 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. 서일원, 이규환, 백경오 (2005) 사행수로에서 2차류 특성에 관한 실험적 연구, 2005 한국수자원학회 학술발표회논문집, 한국수자원학회, pp. 976-980.
2. 이두한, 이찬주, 김명환 (2005) 복단면 사행 하도의 흐름 특성에 대한 실험 연구, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제25권, 제3B호, pp. 197-206.
3. Chow, V. T.(1959) Open-channel hydraulics, McGraw-Hill, p.196.
4. Sellin, R. H. J., Ervine, D. A., Willetts, B. B.(1993) Behaviour of meandering two-stage channels, Proceedings of Institution of Civil Engineers Water Maritime and Energy, Vol. 101, pp. 99-111.