하천 흐름 수치모의에 미치는 조도계수의 영향 분석

Analysis of Effect of Roughness Coefficient on Numerical Simulation for Stream Flow

배재석* · 신충훈** · 이장춘*** · 윤성범****

Bae, Jae Seok · Shin, Choong Hun · Lee, Jang-Choon · Yoon, Sung Bum

Abstract

For the determination of the appropriate roughness coefficient applied to the dimensional models to analyse the stream flow, various numerical simulations with a straight channel, a straight channel with obstructions, and a meandering channel were performed using HEC-RAS as one-dimensional model, RMA2 as two-dimensional model, and FLOW-3D as three-dimensional model with a same Manning's n -value. From the simulation results it was found that each model gives different water surface profiles, even though the same roughness coefficient applied to the one-dimensional model was used for the two-and three-dimensional models. Based on the mechanism analyses of the numerical results it was found that the energy loss due to two-or three-dimensional flow effect is considered twice in the two-or three-dimensional model. Thus, the Manning's n -value required for the numerical computation of stream flow is different according to the numerical model adopted, the grid or mesh system and the flow characteristics, and it should be adjusted through the comparison between the observed and calculated surface profiles.

Key words : Flow resistance, Manning's n -value, HEC-RAS, RMA2, FLOW-3D, Mechanism analysis

요 지

하천 흐름해석을 위한 수치모의에 적용되는 적정 마찰계수의 선정을 위하여 직선수로, 지장물이 존재하는 직선수로와 사행수로의 흐름에 대하여 일정한 마찰계수 n 값을 적용하여 1차원 수치모형 HEC-RAS와 2차원 수치모형 RMA2, 그리고 3차원 수치모형 FLOW-3D를 이용하여 수치모의를 수행하였다. 수치모의 결과 2차원 및 3차원 수치모의에 1차원 수치모의에 적용했던 것과 동일한 Manning 계수 n 값을 적용하였음에도 불구하고 각 모형에 따라 서로 다른 수위분포를 주는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 수치모의 결과에 대한 메카니즘 분석을 통해 2차원 및 3차원 흐름효과에 의한 에너지 손실이 중복되어 고려되었기 때문임을 규명하였다. 따라서 하천흐름 모의시 사용하는 수치모형, 격자체계 및 흐름 특성에 따라 요구되는 Manning 계수가 서로 다르며, 실측치와의 비교를 통해 조정하여 사용해야 함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 흐름저항, Manning n 값, HEC-RAS, RMA2, FLOW-3D, 메카니즘 분석

1. 서 론

하천 설계를 위해 구조물 및 하천 흐름에 대한 수치모의가 수행된다. 수치모의는 현장조사를 통해 얻어진 하천의 유량 및 지형자료, Manning 공식(Chow, 1959)에 의한 마찰계수 등을 기반으로 주로 1차원 수치모형을 이용하여 수행된다. 특히, 마찰계수는 하천의 흐름해석에 있어 중요한 요소로 작용한다. 우리나라에서 마찰계수를 결정하는 일반적인 방법은 하상의 특성을 바탕으로 기존에 제안된 마찰계수 값을 적절히 선택한 후 1차원 부등류 모형에 의한 수면고가 관측치와 비

슷해지도록 보정하여 결정하는 것이 일반적이다(김원 등, 1995). 즉, HEC-RAS 모형을 비롯한 1차원 수치모형을 이용하여 과거 홍수사상을 수치모의하고 현장관측 자료인 실측수위와 수치모의를 통해 계산된 수위의 오차가 가장 작아지도록 마찰계수를 보정 및 결정하는 것이다. 이렇게 1차원 수치모형을 이용하여 선정된 마찰계수는 구조물 설계를 위한 2차원과 3차원 수치모형 실험에 그대로 적용된다. 일반적으로 1차원 수치모형 실험은 하천의 전반적인 흐름을 파악하기 위하여 수행되며, 2차원 수치모형 실험은 하천의 범람, 하천 곡류부의 흐름거동 등 1차원 수치모형 실험 결과를 바탕으로

*정회원 · 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정(E-mail : bjjae194@hanyang.ac.kr)

**한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

***전북대학교 응용시스템공학부 사회기반공학전공 교수

****정회원 · 한양대학교 공학대학 건설환경공학과 교수(교신저자)

보다 세부적인 하천 흐름을 파악하기 위해 수행된다. 최근에는 3차원 수치모형과 컴퓨터 성능의 발전으로 보, 교량 등 하천 구조물 주변의 세부적인 흐름파악을 위해 FLOW-3D 등을 비롯한 3차원 전산유체해석 수치모형이 실무에 사용되고 있는 추세이다. 그러나 1, 2, 3차원 모형들에 동일한 바닥마찰계수를 적용한 수치모의 결과를 비교해보면 1, 2, 3차원 각 모형 별로 서로 다른 수위분포가 계산됨을 확인할 수 있으며 이렇게 도출된 다양한 결과들은 실제 하천 구조물 설계에 혼란을 초래할 가능성이 있다.

본 연구에서는 1, 2, 3차원 수치모형에서 동일한 마찰계수를 사용할 때 서로 다른 수위분포가 계산되는 원인을 파악하기 위해 단면 및 형태가 다른 6가지 종류의 수로에 대하여 1, 2, 3차원 수치모형 실험을 수행하였다. 수치모형은 실무에서 설계를 위해 주로 사용되고 있는 HEC-RAS(1차원 수치모형), RMA2(2차원 수치모형), 그리고 FLOW-3D(3차원 수치모형)를 적용하였으며, 수치모의 결과를 분석하여 그 원인을 파악하고자 하였다.

2. 에너지손실과 바닥마찰

하천 흐름에서 에너지 손실은 다양한 형태로 나타난다. 에너지 손실은 크게 표면마찰(skin friction)에 의한 에너지손실과 수중 저항체의 후면에 형성되는 와류에 의한 형상저항(form drag)에 따른 에너지 손실로 구분된다. 하천 흐름해석에서 이러한 손실을 모두 고려하기 위해서는 3차원 해석이 필요하다. 그러나 전산비용과 시간의 제약으로 천수방정식과 같이 수심 적분한 2차원 수치모형을 사용하거나, 수심과 폭 방향 적분을 통한 1차원 수치모형이 사용된다. 이와 같이 계산 편의를 위해 한 가지 차원을 희생시킬 때마다 해석 가능한 물리적 현상도 동반하여 줄어들게 된다. 예를 들어 수심 적분된 수평 2차원 수치모형은 수평축을 중심으로 회전하는 와류성분을 해석할 수 없으며, 1차원 수치모형은 모든 방향의 와류성분을 해석할 수 없으므로, 무시되는 와류성분에 의해 발생하는 형상저항에 의한 에너지 손실은 모두 바닥마찰에 흡수시켜 흐름 해석을 수행한다. 3차원 해석을 수행하더라도 격자간격보다 작은 저항체에 의한 에너지 손실은 벽면마찰에 포함시켜 해석한다. 예를 들어 3차원 수치모의에서 하천 바닥에 나타나는 사면(ripple이나 dune) 등을 매우 작은 격자를 사용하여 해상함으로써 하나하나의 사면에 의한 와류를 직접 해석하는 경우 바닥마찰은 바닥재질의 입경에 기초한 표면마찰만 고려하게 되며, 사면의 형상을 해상할 수 없을 정도의 큰 격자를 사용하는 경우에는 사면 형상에 의한 에너지손실을 표면마찰에 포함시켜 바닥마찰계수를 증가시켜 해석한다. 물론 후자가 일반적이다.

한편 하천기본계획 수립 등 하천 흐름해석에서 주로 사용되는 바닥마찰계수인 Manning의 n 값은 HEC-RAS 등의 1차원 수치모형을 기준으로 100년 빈도 등의 홍수유량에 대해 설정된 것으로 일반적으로 우리가 알고 있는 하천의 n 값이다. 근래 컴퓨터 성능의 향상으로 하천의 만곡효과나 하천 내부에 설치되는 각종 구조물에 의한 흐름변화를 해석

하기 위해 2차원 수치모형의 사용도 일반화되었으며, 보 등과 같이 하천 전폭에 걸쳐 설치되어 월류가 발생하는 구조물에 대해서는 3차원 수치모의도 수행되고 있는 실정이다. 이러한 2차원 및 3차원 수치모의 시 1차원 수치모의에 의해 구해진 바닥마찰 계수를 그대로 사용하면 저항체 후면에 발생하는 와류성분에 의한 에너지손실이 중복 산정되어 일반적으로 상류 수위가 과도하게 산정된다.

본 연구에서는 일반적으로 알려진 바닥마찰계수를 2차원 및 3차원 수치모형에 그대로 사용하였을 때 발생 가능한 문제점을 실제 수치모의를 통하여 확인하고, 그 대책에 대해 검토한다.

3. 수치모형

3.1 1차원 수치모형

본 연구에서는 HEC-RAS 수치모형을 이용하여 1차원 정상류 수치모의를 수행하였다. HEC-RAS는 미공병단(U.S. Army Corps of Engineers)의 수문공학센터(Hydrologic Engineering Center)에서 HEC-2모형을 확장시켜 개발한 하천 흐름해석 프로그램으로 정상류 및 부정류를 비롯하여 유사현상까지 수치모의가 가능하다. 또한, HEC-RAS는 교량, 암거, 웨어 등 다양한 하천 구조물을 지원하고 있으며 이를 고려한 하천 흐름해석이 가능하다. HEC-RAS의 정상류 수치모의는 에너지 방정식을 지배방정식으로 사용하여 표준축차법을 통해 하천의 수면형을 계산하고 Manning의 식에 의한 바닥마찰과 단면의 수축 및 확대에 의한 에너지 손실을 고려한다. 식 (1)은 HEC-RAS 정상류 흐름해석을 위한 에너지 방정식을 보여준다.

$$z_2 + y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = z_1 + y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

3.2 2차원 수치모형

2차원 정상류 수치모의를 위해서는 RMA2 수치모형이 사용되었다. RMA2 수치모형은 하천, 하구 및 해안 등에서 동수역학적인 문제해석을 위한 2차원 흐름을 모의할 수 있는 수심적분 자유수면 유한요소 프로그램이다. 본 모형은 정상류 및 부정류에 대하여 대상 수역의 수위와 유속을 제공하는 TABS프로그램의 핵심으로 미국 Resource Management Associates Inc.의 Norton 등에 의해 처음으로 개발되어 미국 WES(Waterway Experiment Station)에서 지속적인 수정보완으로 현재의 모형이 완성되었다(정용태 등, 2000). RMA2의 지배방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 수심 적분한 운동량 방정식으로 다음과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\epsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial a}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \tau_x = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\epsilon_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial a}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \tau_y = 0 \quad (4)$$

3.3 3차원 수치모형

본 연구에서는 3차원 수치모의를 위해서 FLOW-3D 수치모형을 적용하였다. FLOW-3D는 미국 Flow science Inc.에서 개발한 범용 전산유체해석 모형으로 Navier-Stokes 방정식을 유한차분법으로 계산한다. MAC (Marker and Cell) 방법과 SOLA (SOLution Algorithm)-VOF (Volume of Fluid) 기법을 기본 수치기법으로 확장한 알고리즘을 사용하며 자유표면이 존재하는 경우에 그 장점이 있는 것으로 알려져 있다. FLOW-3D는 난류흐름을 해석하는 경우에 RANS 방정식 모형에 혼합거리(mixing length) 모형, 표준 $k-\epsilon$ 모형, RNG (Renormalization Group) $k-\epsilon$ 모형 등 다양한 난류모형을 결합하여 사용하거나 LES (Large Eddy Simulation) 기법을 사용한다(이상목, 2007; 최준우 등, 2008). 또한, FLOW-3D는 FAVOR (Fractional Area Volume Obstacle Representation) 기법을 사용하여 직사각형의 격자체계를 사용하면서도 유체의 영역과 구조물의 영역을 구분하여 자유수면의 형상을 효과적으로 표현할 수 있다(FLOW-3D user manual, 2010). 본 연구에서는 일반적으로 광범위한 흐름조건에 적용할 수 있는 RNG $k-\epsilon$ 난류모형을 수치모의에 적용하였다. RNG $k-\epsilon$ 난류모형은 난류흐름에서 유효점성계수를 분자점성계수와 난류점성계수의 합으로 표현하여 사용하는 난류점성가정을 사용하는 난류모형이다(최준우 등, 2008).

4. 수로의 n 값 추정

4.1 수로의 3차원 흐름 수치모의

동일한 마찰계수 n 값을 적용하여 HEC-RAS, RMA2, 그리고 FLOW-3D를 통해 계산된 수위분포가 각 모형에 따라 서로 다르게 계산됨을 확인하기 위해 수로의 단면 및 형태가 다른 5가지 종류의 가상수로를 선정하였으며, 이를 Table 1과 Figs. 1~5에 제시하였다.

Fig. 1은 단면의 형태가 폭이 20 m인 직사각형이고 바닥경사가 0.001로 일정한 직선수로(case A)를 나타내고 있으며, Fig. 2는 직선수로의 양쪽 제방에 폭 1 m, 길이 10 m의 횡돌출부가 40m마다 반복적으로 존재하는 경우(case B)이다. Fig. 3은 직선수로의 바닥에 하천 전폭에 걸쳐 폭 10 m, 높이 0.25 m의 바닥돌출부와 함몰부가 반복적으로 나타나는 연직돌출부가 존재하는 경우(case C)이며, Fig. 4는 Fig. 2와

Table 1. Channel characteristics to study Manning's n -value

Case	Channel alignment	Slope	Water depth (m)	Remark
A	Straight	0.001	3	plane
B	Straight	0.001	3	lateral obstructions
C	Straight	0.001	3	vertical obstructions
D	Straight	0.001	3	lateral and vertical obstructions
E	Meandering	0.001	3	plane

Fig. 3에 보인 횡돌출부와 연직돌출부가 합성된 경우(case D)이다. Fig. 5는 직사각형 단면형태의 사행수로(case E)이다. 4가지 직선수로의 바닥경사는 모두 0.001이며, 사행하천의 경우 하천 중심선을 따른 바닥경사는 평균적으로 0.00086이며, 하천 상하류간 직선거리를 기준으로 한 경사는 직선수로와 같이 0.001이다. 좌표체계는 수로의 하류단($x = 0$ m)으로부터 상류단($x = 1240.97$ m) 방향으로 x 좌표를, 수로의 폭 방향으로 y 좌표를 설정하였다.

본 연구에 적용된 5가지 가상수로는 실측데이터가 없으므로 3차원 FLOW-3D 모형을 이용하여 하천 바닥과 측벽 및 돌출구조물 벽면 등의 유효 벽면 거칠기 높이(effective roughness height)를 0.16 m로 주고 주어진 등류수심 $h = 3$ m에 대한 유량을 구하여 이를 실측치로 사용하였다. 여기서 등류라 함은 횡돌출부나 연직돌출부에 의한 와류 등으로 인해 상세한 흐름 양상은 등류가 아니지만 흐름분포를 인근 공간에 대해 평균한 개념의 등류를 의미한다. 또한 FLOW-3D의 계산격자를 돌출부 형상을 충분히 해상할 수 있을 정도로 작게 구성하여 지형 급변부 후면에서 발생하는 와류로 인한 에너지 손실은 수치모의에서 자동적으로 계산되므로 수치모의에 사용된 유효 벽면 거칠기 높이는 표면마찰(skin friction)만을 포함한다. 3차원 수치모형 FLOW-3D에 사용된 유효 벽면 거칠기 높이에 해당하는 Manning 계수 n 값은 최준우 등(2008)이 제안한 다음 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

Fig. 1. Straight channel with plane bottom and wall (Case A)

Fig. 2. Straight channel with periodic lateral obstructions (Case B)

Fig. 3. Straight channel with periodic vertical obstructions (Case C)

Fig. 4. Straight channel with periodic lateral and vertical obstructions (Case D)

Fig. 5. Meandering channel with plane bottom and wall (Case E)

$$k_s' = R_h \exp \left[\kappa \left(A_r' - \frac{I}{n \sqrt{g}} R_h^{1/6} \right) \right] \quad (5)$$

여기서 A_r' 은 유효 거칠기 상수로 최준우 등(2008)은 RNG $k-\varepsilon$ 모형의 경우 8.3을 제시하였다. 본 연구에서는 지장물이 없는 case A의 폭 20 m, 수심 3 m, 수로경사 0.001의 직선 수로에서 유효 벽면 거칠기 높이를 $k_s' = 0.16$ m로 놓고 3차원 해석을 실시하여 등류유량 136 m³/s를 얻은 다음, 동일한 흐름에 대해 1차원 모형인 HEC-RAS를 통해 n 값을 산정한 결과 $n = 0.0243$ 을 얻었으며, 이 두 가지 바닥마찰이 식 (5)를 통해 동등한 에너지손실을 주도록 A_r' 을 8.4318으로 조정하여 사용하였다. 5개 가상수로에 대해 3차원 수치모의를 통해 얻은 주어진 등류수심에 대한 등류유량은 Table 2에 제시하였다. 여기서 수로바닥에 연직돌출부가 주기적으로 나타나는 case C와 D의 경우 등류수심은 국부 평균 하상고로부터 수면까지 켤 수심이다.

4.2 기존 방법에 의한 수로의 값 추정

하천 흐름해석에서 주로 사용되는 바닥마찰계수인 Manning의 n 값은 1차원 수치모형을 사용하여 실측 수위에 근접하도록 추정된 것으로 일반적으로 우리가 알고 있는 하천의 n 값이다. 3차원 수치모의를 통해 얻어진 5가지 가상수로에서의 등류 흐름에 대한 Manning 계수를 1차원 수치모형인 HEC-RAS를 이용하여 추정하였다. 이를 위해 각 수로의 단면제원을 20 m 간격으로 추출하여 HEC-RAS의 지형 입력자료로 사용하였다. 돌출부나 함몰부로 인해 발생하는 단면 급수축 및 급확장으로 인한 손실계수 등은 HEC-RAS에서 제공하는 별도의 에너지손실 고려 기법을 사용할 수도 있으나, 본 연구에서는 실무에서 일반적으로 사용하는 방식대로 소규모 지형 급변부로 인해 발생하는 에너지 손실을 바닥마찰계수 n 에 포함시켜 해석하므로 하천 폭과 수심은 돌출부를 무시한 직선수로(Fig. 1)와 같도록 하였다. 이렇게 얻어진 n 값 추정치를 Table 2에 제시하였다. 각 가상수로에 대해 일반적인 방법으로 추정된 n 값은 3차원 수치모형에서 유효 벽면 거칠기 높이 즉 조고를 0.16 m로 일정하게 사용하였음에도 불구하고 하천 및 지장물의 형상에 따라 서로 다른 값을 보인다. 1차원 수치모형에서는 지장물이나 하천만곡에 의한 에너지 손실을 Manning 계수에 포함시키므로 지장물이 존재하는 case B, C 및 D와 만곡 하천인 case E의 경우 지장물이 없는 직선수로에서 산정된 n 값인 0.0243에 비해 n 값이 크게 증가하였음을 확인할 수 있다.

Table 2. Uniform flow characteristics assumed as measured data and Manning's n -value estimated using 1D numerical model

Case	Roughness height (m)	Water depth (m)	Flow rate (m ³ /sec)	n estimated using 1D model
A	0.16	3	136.0	0.0243
B	0.16	3	119.4	0.0277
C	0.16	3	97.6	0.0340
D	0.16	3	87.1	0.0380
E	0.16	3	100.0	0.0306

5. 기존 방법에 의한 2차원 및 3차원 수치모의

일반적으로 실무에서는 1차원 수치모형을 통해 결정된 Manning계수 n 값을 2차원 수치모의와 3차원 수치모의에 그대로 적용한다. 따라서 본 연구에서도 기존 실무에서와 같은 방법으로 수치실험을 수행하였다. 2차원 수치모형인 RMA2는 마찰계수 n 값을 직접 사용할 수 있으며, 3차원 모형에 대해서는 n 값을 직접 사용할 수 없으므로 식 (5)를 이용하여 조고로 환산하여 사용하였다. 경계조건 설정을 위한 유량 및 하류수위 조건은 1차원 HEC-RAS 모형의 입력자료와 동일하다.

Fig. 6은 Table 1에 제시된 수치모의 5가지 경우(case A, B, C, D 및 E)에 대하여 RMA2를 이용한 2차원 수치모의를 위해 구성된 계산격자를 보여준다. Fig. 6(a)는 직사각형 단면의 직선수로 수치모의(case A와 C)에 적용된 계산격자로서 요소의 총 개수는 24,800개이다. 횡돌출부가 있는 case B와 D에 대해서는 돌출부를 해상할 수 있도록 Fig. 6(b)와 같이 돌출부 부근에 더욱 작은 요소를 사용하였으며, 요소의 총 개수는 41,664개이다. Fig. 6(c)는 직사각형 단면의 사행수로 수치모의(case E)에 적용된 계산격자이고 요소의 총 개수는 5,400개이다. 본 연구에서는 와점성계수(eddy viscosity)를 일반적으로 실무에서 사용하고 있는 10~1,000 Ns/m²에 대해 다양한 와점성계수가 계산 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 수심적분된 2차원 모형인 RMA2는 연직 제방 벽면에 의한 마찰손실을 고려할 수 없으므로 이를 고려하기 위해 마찰계수 값을 식 (6)을 통해 수정하여 적용하였다.

$$n' = n \left(\frac{R_h'}{R_h} \right)^{2/3} \quad (6)$$

여기서 n' 은 직벽의 벽면마찰을 고려하기 위해 수정된 마찰계수, n 은 1차원 수치모형에 의해 주어지는 통상적인 마찰계수이다. R_h 는 직벽에 의한 윤변이 제외된 동수반경(hydraulic radius)이며 R_h' 은 직벽의 높이가 고려된 동수반경이다. 3차원 수치모의를 위한 계산격자는 모든 경우에 대해 3,219,040개의 계산격자를 구성하였다.

5.1 Case A

Fig. 7은 유량 136 m³/s, 하류수심 3 m, n 값이 Table 2에 제시한 바와 같이 0.0243으로 주어진 직사각형 단면 직선수

Fig. 6. Computational mesh for RMA2

Fig. 7. Water depth profile of case A

로(case A)에 대해 각 모형을 통해 계산된 수심 분포의 비교를 보여준다. Fig. 7에 제시하지는 않았지만 2차원 수치모형인 RMA2의 경우 1차원 모형에 의해 정해진 Manning계수인 $n = 0.0243$ 을 그대로 사용할 경우 1차원과 3차원 수치모형을 통해 계산된 수심 분포보다 상류로 갈수록 수심이 감소하는 결과를 준다. 이는 본 연구에서 사용한 2차원 모형인 RMA2가 전술한 바와 같이 벽면함수를 채용하지 않아 연직 제방 벽면에 의한 마찰이 고려되지 않으므로 1차원 및 3차원 모형보다 수심이 작게 계산된다. 따라서 동등한 비교를 위해 2차원 모형의 경우 벽면에 의한 마찰효과를 바닥에 의한 마찰에 포함시키기 위한 수정된 n 값, 즉 식 (6)에 의한 n' 를 사용하여 계산한 수심분포를 1차원 및 3차원 계산 결과와 비교하였다. Fig. 7에 보인 바와 같이 수로상에 돌출부 등이 없는 경우 1차원, 2차원 및 3차원 모형에 의한 계산 결과가 서로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이후에 제시되는 모든 가상수로 수면계산에서 2차원 수치모형인 RMA2에 사용되는 Manning계수는 식 (6)을 이용한 수정된 n 값 즉 n' 를 사용한 결과임을 미리 밝혀둔다.

5.2 Case B

유량 $119.4 \text{ m}^3/\text{s}$, 하류수심 3 m, n 값이 Table 2에 제시한 바와 같이 0.0277로 주어진 횡돌출부가 존재하는 직사각형 단면의 직선수로(case B)에 대한 수치모의를 수행하였다. 1차원 모형에 의해 정해진 n 값인 0.277에 대해 3차원 모형을 위한 조고를 식 (5)에 의해 계산하여 $k_s' = 0.3359 \text{ m}$ 로 설정하고 수면형 계산을 실시한 다음, Fig. 8에 1차원 모형에 의한 수면형과 비교하여 제시하였다. 여기서 2, 3차원 수치모형의 결과는 해당 지점의 상하류 20 m 구간과 하천폭에 대해 평균된 국부적인 평균수심을 나타낸다. 2차원 수치모형인 RMA2는 횡돌출부 후면부에 발생하는 와류를 계산함에 있어서 운동방정식의 점성계수 ε 의 크기에 따라 에너지 손실량이 변하게 된다. 실제 점성계수는 3차원 모형인 FLOW-3D처럼 난류모형을 채용하여 난류 점성계수를 계산하여 사용해야 하나, 본 연구에서 사용된 2차원 모형인 RMA2에서는 난류모형을 채용하지 않고 사용자가 점성계수 ε 을 일정한 값으로 지정해주도록 되어 있어 정도가 떨어진다. 본 연구에서는 RMA2에 요구되는 적절한 점성계수 선정을 위해 점성계수 ε 을 $10 \sim 1,000 \text{ Ns/m}^2$ 의 범위 내에서 임의로 설정하여 수면형을 계산하고, 3차원 모형에 의해 계산된 결과와 일치하는 수면형을 주는 점성계수를 찾아내는 방법을 적용하였다. 2차원 모형을 위한 수정 n 값은 식 (6)에 의해 0.033으로 설정하였으며, 다양한 점성계수 ε 에 대해 수면형을 계산하여 Fig. 8

Fig. 8. Water depth profile of case B with various for RMA2

Fig. 9. Water depth profile of case B using $\varepsilon=30 \text{ Ns/m}^2$ for RMA2

에 1차원 및 3차원 결과와 비교하여 도시하였다.

Fig. 8에 보인 바와 같이 2차원 모형에 의한 수면형은 점성계수 ε 에 따라 수면형이 크게 달라진다. 일반적으로 2차원 모형에서 점성계수가 증가할수록 상류 수위가 증가함을 알 수 있다. 이 분석을 통해 3차원 모형에 의한 수면형과 가장 근접한 결과를 주는 점성계수인 30 Ns/m^2 를 선정하여 모든 가상수로의 수치모의에 공통적으로 사용하였다. 참고로 횡돌출부가 없는 case A, C와 E의 경우에는 2차원 모형에서 점성계수를 어떤 값을 선정하더라도 거의 동일한 결과를 주는 것을 확인하였다.

Fig. 9는 case B에 대한 1, 2, 3차원 수치모형에 의해 계산된 수면형을 비교한 것으로서, 2차원 및 3차원 수치모의에 의한 수심이 1차원 모형에서와 동등한 마찰계수를 적용하였음에도 불구하고 1차원 결과에 비해 상류로 갈수록 증가함을 보인다. 이는 2차원 및 3차원 수치모의에서 횡돌출부 배후의 와류로 인한 에너지 손실이 지배방정식에 의해 자동으로 계산되므로 이중으로 고려되었기 때문이다.

5.3 Case C

Fig. 10은 유량 $97.6 \text{ m}^3/\text{s}$, 하류수심 3 m, n 값이 Table 2에 제시한 바와 같이 0.034로 주어지고 수로바닥에 연직돌출부가 존재하는 직사각형 단면의 직선수로(case C)에 대한 수면형 수치모의 결과를 비교하여 제시한 것이다. 2차원 모형의 경우 수정 n 값은 식 (6)에 의해 0.0405로 설정하였고, 점성계수는 전술한 바와 같이 30 Ns/m^2 를 사용하였다. 3차원 모형의 경우 조고는 식 (5)에 의해 $k_s' = 0.8968 \text{ m}$ 를 사용하였다.

Fig. 10. Water depth profile of case C

하천 흐름 수치모의에 미치는 조도계수의 영향 분석

Fig. 11. Water depth profile of case D

Fig. 10에 보인 바와 같이 1차원 및 2차원 수치모형의 계산 결과는 거의 비슷하게 계산되었으나, 3차원 수치모형의 계산 결과는 상류 수심이 상대적으로 크게 계산되었다. 이는 3차원 수치모의에서 연직돌출부 배후의 와류로 인한 에너지 손실이 지배방정식에 의해 자동으로 계산되므로 이중으로 고려되었기 때문이다. 참고로 2차원 모형은 연직돌출부 형상을 해상할 수 있을 정도의 작은 격자를 사용하였음에도 2차원 지배방정식의 한계로 돌출부 후면에서 발생하는 수평축 와류를 고려할 수 없어 1차원 모형과 비슷한 결과를 준다.

5.4 Case D

Fig. 11은 유량 $87.1 \text{ m}^3/\text{s}$, 하류수심 3 m , n 값이 Table 2에 제시한 바와 같이 0.038 로 주어지고 횡돌출부와 연직돌출부가 동시에 존재하는 직사각형 단면의 직선수로(case D)에 대한 수면형 수치모의 결과를 비교하여 제시한 것이다. 2차원 모형의 경우 수정 n 값은 식 (6)에 의해 0.0453 로 설정하였고, 점성계수는 전술한 바와 같이 30 Ns/m^2 를 사용하였다. 3차원 모형의 경우 조고는 식 (5)에 의해 $k_s' = 1.4128 \text{ m}$ 를 사용하였다. Fig. 11에 보인 바와 같이 2차원 수치모형의 수면고가 1차원 모형에 비해 크게 계산되었고, 3차원 모형은 2차원 모형보다 더 크게 계산되어, 동등한 바닥마찰을 사용하였음에도 불구하고 3가지 수치모형이 서로 다른 결과를 준다. 이는 앞에서 살펴본 바와 같이 2차원 수치모형은 횡돌출부 배후의 와류로 인한 에너지 손실이 이중으로 고려되었고, 3차원 수치모형은 횡돌출부와 연직돌출부에 의한 에너지 손실이 중복되어 고려되었기 때문이다.

5.5 Case E

Fig. 12는 유량 $100 \text{ m}^3/\text{s}$, 하류수심 3 m , n 값이 Table 2에 제시한 바와 같이 0.0306 으로 주어진 직사각형 단면의 사행수로(case E)에 대한 수면형 수치모의 결과를 비교하여 제시한 것이다. 2차원 모형의 경우 수정 n 값은 식 (6)에 의해 0.0364 로 설정하였고, 점성계수는 전술한 바와 같이 30 Ns/m^2 를 사용하였다. 3차원 모형의 경우 조고는 식 (5)에

Fig. 12. Water depth profile of case E

의해 $k_s' = 0.5478 \text{ m}$ 를 사용하였다.

Fig. 12에 보인 바와 같이 1차원과 2차원 수치모형의 수면형은 일치하는 반면, 3차원 수치모형에 의한 수심은 상류로 갈수록 더 크게 계산되었다. 이는 사행수로의 만곡부에서 발생하는 이차류(secondary current)의 영향으로 판단된다. Henderson(1966)은 하천의 만곡부에서 이차류가 발생함을 보인 바 있으며, Blanckert et al.(2001)은 만곡부 흐름에 대한 수리실험을 통해 2가지 종류의 이차류가 동시에 발생함을 보인 바 있는데, 첫 번째는 수로의 중앙부에서 시계방향으로 흐름이 발생하는 일반적인 이차류 흐름(center-region cell)이며, 두 번째는 외안부에서 이와 반대로 반시계방향으로 회전하는 약한 회전류(outer-bank cell)이다. 3차원 수치모형은 사행수로의 만곡부에서 발생하는 이차류 흐름과 그로 인한 에너지 손실이 자동적으로 계산되므로 바닥마찰에 포함시킨 손실과 모형에 의해 계산된 손실이 이중으로 고려되어 1차원 및 2차원 결과에 비하여 상대적으로 큰 결과 값을 주었다. Fig. 13은 FLOW-3D 수치모의를 통해 산출된 만곡부 횡단면 유속 벡터를 보여주고 있는 바, Blanckert et al.(2001)이 제시한 두 종류의 이차류 흐름현상과 정성적으로 일치함을 잘 보여주고 있다.

비록 2차원 수치모형의 경우 전술된 이차류를 표현할 수는 없지만 흐름방향과 횡방향의 2차원적 영향을 고려할 수 있으므로 Fig. 13의 3차원 수치모형에서 표현된 바와 같이 하천의 만곡부에서 횡방향에 대한 수위경사를 표현할 수 있으며 이는 Fig. 14에 제시되었다. Fig. 14는 2차원 수치모형을 통해 계산된 만곡수로의 수심분포를 보여준다. 1차원 수치모형은 하천단면에 대해 적분한 지배방정식을 사용하므로 만곡부의 지형적 영향으로 인해 발생하는 공간적 수위분포 등의 차이를 표현할 수 없으나, 2차원 수치모형은 수로 만곡부 내측

Fig. 13. Secondary flow velocity vector of case E

Fig. 14. Water depth distribution of case E in two dimensional numerical model (RMA2)

Table 3. Appropriate Manning's n -value for 2D model RMA2

ε	Case B		Case C		Case D		Case E	
	n	n'	n	n'	n	n'	n	n'
12.5	0.0243	0.0289	0.0336	0.0400	0.0344	0.0410	0.0306	0.0365
25	0.0238	0.0283	0.0336	0.0400	0.0340	0.0405	0.0306	0.0364
50	0.0229	0.0273	0.0335	0.0399	0.0330	0.0393	0.0305	0.0363
100	0.0210	0.0250	0.0335	0.0399	0.0311	0.0370	0.0304	0.0362
200	0.0176	0.0210	0.0335	0.0399	0.0277	0.0330	0.0301	0.0359
400	0.0059	0.0070	0.0334	0.0398	0.0201	0.0240	0.0296	0.0352
800	-	-	0.0334	0.0398	-	-	0.0286	0.0341

의 수심이 흐름유속에 의한 원심력의 영향으로 외측부에 비하여 상대적으로 작게 나타남을 확인할 수 있다.

6. 기존 방법에 대한 개선

앞에서 살펴본 바와 같이 1차원 수치모형을 통해 결정된 Manning계수 n 값을 2차원 및 3차원 수치모의에 그대로 적용하는 기존 방법은 수치모형의 특성을 고려하지 않아 상류로 갈수록 수면고가 과다 산정됨을 알 수 있었다. 이는 하천 흐름 수치모의에서 각 수치모형이 요구하는 바닥마찰계수가 수치모형의 지배방정식, 격자크기, 유량 등의 흐름조건에 따라 달라진다는 것을 의미한다. 실무에서 주어진 하천의 바닥마찰을 추정하기 위해 주로 사용하는 1차원 수치모형에서도 유량이 증가하면 대체적으로 Manning 계수가 감소하는 것은 잘 알려진 사실이다(김한섭, 2010). 따라서 1차원, 2차원 및 3차원 수치모의를 수행함에 있어서 바닥마찰 계수 n 값은 선정된 수치모형으로 격자 체계를 구성한 다음, 주어진 흐름조건에 대해 수치모의를 수행하고, 실측치와의 비교를 통해 바닥마찰 계수를 각각 결정하여 사용하여야 한다. 본 연구에서 검토한 5가지 가상수로의 등류 흐름에 대해 일반적인 방법으로 추정된 Manning 계수 n 값은 Table 2에 제시한 바와 같이 수로 특성에 따라 서로 다르다. 그러나 3차원 수치모형에 대해서는 1차원 수치모형을 통해 추정된 n 값이 서로 다름에도 불구하고 유효 벽면 거칠기 높이 k_s' 를 0.16 m로 동일하게 사용하여야 한다.

2차원 수치모형인 RMA2는 에너지 손실이 점성계수의 선정과 연관되어 있으므로 각각의 가상수로의 지장물 특성과 선정된 점성계수에 따라 n 값을 Table 3에 제시한 바와 같이 조정하여 사용하여야 한다. 여기서 n' 는 전술한 바와 같이 연직 벽면에서의 마찰을 고려하기 위한 수정 n 값이다.

횡돌출부로 인한 에너지 손실이 주를 이루는 case B와 D의 경우 2차원 모형인 RMA2에서 점성계수가 증가할수록 요구되는 n 값은 감소하는 경향을 보이는데 이는 횡돌출부로 인한 에너지 손실이 점성계수가 증가함에 따라 비현실적으로 증가하기 때문이며, 점성계수가 800 Ns/m²인 경우에는 바닥마찰 조정만으로는 실측 수면형을 재현할 수 없음을 알 수 있다. 이 경우 점성계수를 충분히 감소시키고 실측치와의 비교를 통해 n 값을 조정하여야 한다. 반면 case C의 경우 2차원 모형은 연직돌출부에 의한 에너지 손실을 고려하지 못

하므로 점성계수가 증가하여도 1차원 모형에서 요구하는 것과 거의 동등한 n 값이 요구된다. 사행하천인 case E의 경우에도 2차원 모형이 이차류에 의한 에너지 손실을 고려하지 못하므로 점성계수가 증가하여도 1차원 모형에서 요구하는 것과 거의 동등한 n 값이 요구된다. Case E가 case C에 비해 점성계수의 영향이 상대적으로 큰 것은 사행하천 흐름 특성상 유속이 하천 폭 방향으로 일정하지 않아 2차원 모형에서 점성효과가 나타났기 때문이다.

7. 결 론

본 연구에서는 1차원 수치모형을 이용하여 결정된 바닥마찰 계수를 2차원 및 3차원 하천 흐름 수치모의에 그대로 적용할 경우 서로 다른 수위분포가 계산되는 원인이 마찰계수의 영향임을 확인하기 위하여 단면 및 형태가 다른 5가지 종류 가상수로에 대하여 HEC-RAS(1차원), RMA2(2차원), FLOW-3D(3차원)를 이용한 수치모형 실험을 수행하였다. 실측 데이터가 없는 각 가상수로 흐름에 대하여 FLOW-3D에 유효 거칠기 높이 0.16 m를 적용하여 계산된 등류 유량 및 수심을 실측치로 가정하였고, 1차원 수치모형 HEC-RAS 정상류 수치모의를 통해 가정된 실측치(FLOW-3D 결과)와 가장 일치하는 계산결과를 주는 마찰계수 n 값을 최종적으로 각 수로의 마찰계수로 설정하였으며, 이를 RMA2와 FLOW-3D 수치모형에 그대로 적용하여 총 5가지 경우에 대한 수치모의를 수행하였다. 수치모의 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 수로내 돌출부가 존재하지 않는 직사각형 단면 직선수로의 경우(case A) 1차원, 2차원 및 3차원 수치모형의 계산결과는 서로 잘 일치하고 있다.
- 2) 수로내 횡돌출부가 존재하는 직사각형 단면 직선수로의 경우(case B) 횡돌출부 후면에 발생하는 와류로 인한 에너지 손실이 2차원 및 3차원 수치모의에서 마찰계수 n 의 영향과 함께 이중으로 고려되어 1차원 수치모의 결과에 비해 상대적으로 증가된 상류 수심분포가 계산되었다.
- 3) 수로 바닥에 연직돌출부가 존재하는 직사각형 단면 직선수로의 경우(case C) 연직돌출부 후면에 발생하는 와류로 인한 에너지 손실이 3차원 수치모의에서 마찰계수 n 의 영향과 함께 중복으로 고려되었다. 따라서 3차원

수치모의는 1차원 계산결과에 비하여 상당히 증가된 상류 수심분포가 계산되었음을 확인할 수 있다. 그러나 2차원 수치모형은 수심 적분된 지배방정식을 사용하는 특성으로 인하여 이를 고려할 수 없으며, 따라서 1차원 수치모형과 유사한 계산결과가 도출되었다.

- 4) 수로내 횡·연직돌출부가 모두 존재하는 직사각형 단면 직선수로의 경우(case D) 2차원 수치모형은 횡돌출부에 의한 에너지 손실만이 마찰계수 n 의 영향과 함께 이중으로 고려되는 반면, 3차원 수치모형은 횡돌출부 및 연직돌출부에 의한 에너지 손실이 모두 중복으로 고려되었다. 따라서 2차원 및 3차원 계산결과 모두 1차원 계산결과보다 증가된 상류 수심분포를 보여주고 있으며, 3차원 계산결과가 2차원 계산결과보다 상대적으로 더 크게 증가되었음을 확인할 수 있었다.
- 5) 직사각형 단면 사행수로의 경우(case E) 만곡부에서 발생하는 이차류(secondary current) 흐름은 3차원 수치모형만이 재현할 수 있다. 따라서 이차류 흐름으로 인한 에너지 손실은 3차원 수치모형에서 마찰계수 n 의 영향과 함께 이중으로 고려되었다. 그 영향으로 1차원 및 2차원 수치모형의 계산결과는 거의 일치하는 형태를 보이지만, 3차원 수치모형의 결과는 1차원 및 2차원 수치모의 결과에 비해 상류 수심이 상대적으로 크게 증가되었음을 확인할 수 있다.

1차원 수치모의를 통해 산정된 수로의 마찰계수 n 은 수로의 바닥마찰 뿐만 아니라 소규모 지형 급변부로 인해 발생하는 에너지 손실 및 수로 만곡부에서 발생하는 이차류로 인한 에너지 손실을 집약적으로 포함하고 있는 마찰계수이다. 따라서 이러한 마찰계수 n 을 2차원 및 3차원 수치모형에 그대로 적용하면 지형급변부의 후면에서 발생하는 와류로 인한 에너지 손실 및 사행하천의 이차류에 의한 에너지 손실 등이 2차원 및 3차원 수치모형의 지배방정식에 의해 자동으로 계산되므로 마찰계수 n 의 영향과 함께 이중으로 고려되는 결과를 발생시킨다. 따라서 하천흐름 수치모의를 수행함에 있어서 현 상태에서 이용 가능한 현장 관측 결과를 최대한 활용하여 각 수치모형에 사용되는 바닥마찰계수 n 값 등의 타당성을 확인한 다음, 추가되는 구조물의 영향 등을 검토하는 것이 권장된다.

기 호

A_r' : 유효 거칠기 상수
 g : 중력가속도(m^2/s)
 h_e : 에너지 손실 수두(m)

k_s' : 유효 벽면 거칠기 높이(m)
 n, n' : Manning 계수($sec/m^{1/3}$)
 R_b, R_h' : 동수반경(m)
 t : 시간(sec)
 u, v : x, y 방향 유속(m/s)
 V_1, V_2 : 단면 평균 유속(m/s)
 y_1, y_2 : 수심(m)
 z_1, z_2 : 하상표고(m)
 α_1, α_2 : 운동에너지 보정계수
 ε : 와점성계수(Ns/m^2)
 κ : von Karman 상수(0.4)
 ρ : 유체 밀도(kg/m^3)
 τ : 마찰응력(N/m^2)

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지원 첨단항만건설기술개발사업(과제명: 항만권역 태풍 및 지진해일 재해대응체계 구축)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김원, 김양수, 우효섭 (1995) 부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수 산정, **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제28권, 제6호, pp. 133-146.
- 김한섭 (2010) 수리학적 방법을 이용한 국내 하천의 조도계수 산정, 박사학위논문, 한양대학교.
- 이상목 (2007) 3차원 전산유체해석모형의 벽면마찰산정을 위한 거칠기 높이 결정, 석사학위논문, 한양대학교.
- 정용태, 이용환 (2000) RMA2 모형에 의한 동천하류부에서의 흐름특성 연구, **환경관리학회지**, 한국환경관리학회, 제6권, 제3호, pp. 305-313.
- 최준우, 백운일, 이상목, 윤성범 (2008) 개수로 흐름의 3차원 전산해석을 위한 유효 벽면거칠기 산정, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제6B호, pp. 627-634.
- Blanckaert, K. and Graf, W.H. (2001) Mean flow and turbulence in open-channel bend, *Jour. of Hydr. Engrg., ASCE*, Vol. 127, No. 10, pp. 835-847.
- Chow, V.T. (1959) Open-channel hydraulics, McGraw-Hill, New York.
- Flow Science, Inc. (2010) FLOW-3D User Manual.
- Henderson, F.M. (1966) Open channel flow, The Macmillan Company, New York.

© 논문접수일 : 11년 11월 10일
 © 심사의뢰일 : 11년 11월 15일
 © 심사완료일 : 12년 04월 09일