

수리동역학적 모의를 위한 적정 격자해상도 산정방법 Evaluation of Optimal Grid Resolution for Hydrodynamic Proper Simulation

안정민* · 박인혁** · 류시완*** · 허영택****

Ahn, Jung Min · Park, In Hyeok · Lyu, Si Wan · Hur, Young Teck

要 旨

본 연구에서는 CCHE2D와 EFDC모형을 이용한 모의를 통하여 격자의 횡단해상도에 따른 물리적 지형의 재현성과 모의결과에 대한 영향을 검토하고자 하였다. 낙동강 금호강 유입구간을 대상으로 2006년 강우사상에 대한 부정류 모의를 통하여 면적고도곡선과 대상구간내 수위관측소 지점에서의 실측치와 모의치간의 비교를 통하여 구성격자망의 적정성 및 모의결과에 대한 영향을 각각 검토하였다. 일반적으로 격자 해상도의 증가는 계산시간의 증가를 야기하므로 수행 내용과 목적, 계산의 효율성 측면에서 적절한 격자해상도의 선택이 필요하다. 정밀한 모의를 위해서는 고해상도 격자를 이용한 모의를 수행해야 하나, 빠른 의사결정이 요구되는 홍수기와 같이 모형수행의 효율성을 고려해야 하는 경우에 적용 가능한 물리적 지형의 재현성과 결과에 대한 신뢰성을 보장할 수 있는 적정 격자해상도가 존재함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : CCHE2D, EFDC, 직교곡선격자, 격자해상도, 낙동강

Abstract

The effect of the grid resolution on the hydrodynamic simulation has been investigated by using CCHE2D and EFDC. Since a high resolution of the grid results in the increase of computation time, an appropriate grid resolution should be selected by considering the efficiency of simulation according to the objectives of projects. In order to understand the effect of grid resolution and determine the optimal grid resolution, several cases with different lateral grid resolutions have been simulated for the reach of Nakdong river at the confluence of Kumho river for the floods in 2006. Orthogonal curvilinear grids for the domain have been constructed from the survey products at the sections with the longitudinal interval of 20 m. Area-elevation curve and the comparison of simulated results with measured stage at the specific station have been used to check the effect of grid resolution. From the results, the existence of optimal grid resolution has been observed, which ensure both efficiency of computation and certainty of results.

Keywords : CCHE2D, EFDC, Orthogonal Curvilinear Grid, Grid Resolution, Nakdong River

1. 서 론

해외 각국은 일찍이 경제 부흥과 국민 삶의 질 향상을 위하여 수변구역 위주의 지역 개발 사업을 펼치고 있으며, 우리나라도 예외는 아니어서 수변구역 개발의 필요성과 수요가 증대되고 있는 실정이다. 이러한 필요성의 일환으로 국내에서도 수변구역의 활용을 증대할 수 있는 일관된 종합계획 수립 및 시행을 위해 범정부

차원에서 하천별 종합계획을 수립하여 추진하고 있다. 그러한 과정에서 발생할 수 있는 대규모 하천정비로 인한 하도 내 지형변화는 급격한 수리 특성의 변화와 그로 인한 예상치 못한 피해를 야기할 수 있다. 따라서 하도에서의 복잡한 수리학적 거동을 평가할 수 있는 다양한 기법들을 적용한 다차원 수치모형들이 최근들어 활발하게 개발되어 수자원설계분야에서 유용하게 이용되고 있다. 이러한 다차원 수치모형들을 실제 하도에 적

2012년 2월 6일 접수, 2012년 3월 6일 채택

* 중신회원 · 한국수자원공사 물관리센터 연구원(ahnjm80@gmail.com)

** 한국수자원공사 물관리센터 연구원(teryoops@nate.com)

*** 창원대학교 공과대학 토목공학과 부교수(siwon@changwon.ac.kr)

**** 교신저자 · 중신회원 · 한국수자원공사 물관리센터 선임연구원(korcivil@hanmail.net)

용하기 위해서는 많은 매개변수들을 적절하게 고려하여야 한다. 특히 유역의 지형정보는 하천흐름을 결정하는 중요한 요소로, 다차원 수치모형을 수행하기 위해서는 실제 지형에 대한 정확한 3차원 지형정보가 필수적이다. 하천구역 내에는 주수로와 홍수터가 존재하고 두 구간 사이에는 큰 표고차가 발생하는 등 지형의 급격한 변화가 존재한다. 또한, 하도 내에 존재하는 하중도와 각종 수리구조물은 흐름에 큰 영향을 미치기에 수치모형을 활용한 모의에서는 이러한 특징들을 종합적으로 고려하여 지형정보를 구축해야 한다. 수치모의를 위해 사용되는 지형자료를 모든 지점에 대해 취득하는 것은 현실적으로 불가능하므로, 하천의 표석을 따라 대표되는 지점에서 필요로 하는 횡단자료를 수집한 후 이를 미관측 지역까지 확장하여 사용하게 된다. 관측된 자료를 이용한 미관측 지점 값을 추정하는 과정에서는 보간 기법이 사용되는데, 제한된 해상도를 가지는 원자료로부터 보간과정을 통해 도출되는 지형자료의 정확도 및 해상도는 모의결과에 큰 영향을 미치게 된다. 또한, 격자기반의 수치모형은 격자해상도에 따라 구동시간이 차이가 나며 고정밀의 수치해석을 위해 격자해상도를 증가시킬 경우 많은 시간이 소요되기 때문에 정확도와 계산시간을 적절하게 고려할 수 있는 타협점을 찾는 기법이 제시되어야 한다. 격자해상도와 관련된 국내 연구로는 대표적으로 정인주 등(2002)은 DEM에 의한 지형인자 추출에 따른 격자 크기의 영향에 관한 연구를 진행하였고 최용준과 김주철(2011)은 격자 형태의 지형학적 분산 개념을 이용하여 격자 해상도에 따른 배수경로 길이 및 특성유속의 변화에 대해 연구를 진행하였다. 따라서 지형정보의 해상도에 따른 수치모의결과의 변화를 살펴봄으로써 모의과정에 있어서의 물리적 지형의 재현성 및 그에 따른 하도 수리특성 분석에 대한 영향을 정량적으로 평가할 필요성이 있다.

Center for Computational Hydroscience and Engineering(CCHE2D)와 Environmental Fluid Dynamics Code(EFDC)모형은 많은 국내의 연구자들에 의해 검증된 모형이다. 대표적으로 국내에서는 허영택과 박진혁(2009)이 EFDC모형을 낙동강 하류부에 적용하여 수리해석 적용성을 평가하였으며 정상만 등(2010)은 EFDC 모형을 금강 하류에 적용하여 염수쟁기 특성을 연구하였다. 강형식 등(2011년)은 유역 모형과 하천 모형의 연계를 통한 낙동강 분류 흐름을 예측하기 위해 EFDC 모형을 활용하였다. 김연수 등(2010)은 CCHE2D 모형을 이용하여 급만곡부의 흐름특성을 분석 검증 하였다. 지운 등(2010, 2011)은 하구둑에서의 하폭축소 방법을 이용한 퇴사저감 효과 분석과 상류 접

근수로에서의 유사량 공식 및 유사 이송형태에 따른 하상변동 수치모의에 관한 연구를 위해 CCHE2D 모형을 활용하였고 이지완 등(2011)은 CCHE2D 모형으로 안성천의 하천 분류 및 2차원 수리특성분석을 수행하였다.

본 연구에서는 낙동강 금호강 합류부 일대에 대해 중방향 20m 간격으로 얻어진 측량성과자료를 통해 QMESH(허영택 등, 2010)로 직교곡선격자망을 구성하고 횡단지형격자 크기에 따른 물리적 지형의 재현성에 대한 평가와 더불어 그로 인한 하도 수리특성 모의결과에 대한 영향을 분석하였다. 하도 내 흐름 모의 결과를 수위관측소 관측값과 통계적 기법을 통해 정량적으로 평가하여 적정 격자해상도를 산정하는 방법을 제안하고자 하였다.

2. 모형 적용

2.1 CCHE2D Model

본 연구에서는 미시시뮬 대학에서 개발한 수심평균 2차원 수리 해석 모형인 CCHE2D(Jia and Wang, 2001)를 이용하였으며 CCHE2D모형은 오랜 연구과정을 통해 많은 연구기관, 대학, 정부기관, 환경단체, 건설업체에서 이용되고 있다. CCHE2D는 부정류, 난류흐름특성분석, 유사, 수질 등 다양한 모듈을 탑재하고 있으며 편리한 Graphical Users Interface(GUI)를 갖추고 있다(M.A. Nassar, 2010). CCHE2D모형에서 흐름에 대한 자유수면위는 수심 적분된 연속 방정식에 의해 계산되며 식은 각각 (1)~(3)과 같다.

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{cor}v \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + f_{cor}u \quad (3)$$

여기서, u 는 x 방향 수심적분 유속, v 는 y 방향 수심적분 유속, z 는 저면표고(El. m), g 는 중력가속도, ρ 는 물의 밀도($1,000 \text{ kg/m}^3$), h 는 격자 수심, f_{cor} 는 코리올리 계수, τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{yy} 는 각각 수심 적분된 레이놀즈 응력, 그리고 τ_{bx} , τ_{by} 는 하상 그리고 흐름에 따른 전단 응력이다. 수면에서의 전단응력 항들은 미소하기 때문

에 바람으로 인한 전단효과는 고려하지 않는 것으로 가정한다.

2.2 EFDC Model

EFDC(Hamrick, 1996)모형은 유동 및 물질수송을 모의하는 다변수 유한차분 수치모형으로서 VIMS (Virginia Institute of Marine Science)에서 개발하였으며, 미국 환경청(Environmental Protection Agency)의 공인모형이다. 모형에 사용되는 격자체계는 수평적으로 직교(Cartesian) 또는 곡면(Curvilinear) 좌표계를 사용하고 수직적으로 σ -좌표계를 사용한다. EFDC모형은 질량보존기법을 이용하여 천해역에서 조간대 처리가 가능하도록 설계되어져 있어 조간대가 넓게 분포하는 우리나라 연안이나 하천에 용이하게 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. EFDC모형은 이론적인 면과 수치해석적인 면에서 Blumberg and Mellor(1987)의 모형과 많은 공통점을 가지며, 연속방정식과 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial x} + \frac{\partial(vH)}{\partial y} = Q_H \quad (4)$$

$$\frac{\partial(uH)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2H)}{\partial x} + \frac{\partial(uvH)}{\partial y} - fHv = -gH\frac{\partial\eta}{\partial x} - C_B|uv| + \frac{\partial}{\partial x}\left(HA_H\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(HA_H\frac{\partial u}{\partial y}\right) + \tau_x \quad (5)$$

$$\frac{\partial(vH)}{\partial t} + \frac{\partial(uvH)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2H)}{\partial y} + fHu = -gH\frac{\partial\eta}{\partial y} - C_B|uv| + \frac{\partial}{\partial x}\left(HA_H\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(HA_H\frac{\partial v}{\partial y}\right) + \tau_y \quad (6)$$

$$A_H = C\Delta x\Delta y\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2\right]^{1/2} \quad (7)$$

$$C_B = \frac{gn^2}{H^{7/3}} \quad (8)$$

여기서, $H=h+\eta$ 는 기준면 하 수심 h (m)와 기준면상 수위 η (m)를 합한 총 수심(m), u, v 는 x, y 축에서의 수평유속(m/sec), f 는 Coriolis parameter, $|uv| = \sqrt{u^2+v^2}$ 는 유속, g 는 중력가속도(m/sec²), C_B 는 바닥면 마찰계수, A_H 는 수평난류점성계수(m²/sec), Q_H 는 외부로부터 유체의 유입/유출량(kg m/sec), ρ 는 밀도(kg/m³), τ_x, τ_y 는 x, y 축에서의 바람응력(m/sec), C 는 수평 혼합 상수, $\Delta x, \Delta y$ 는 x, y 축에서 격자크기(m), n 은 Manning의 조도계수이다.

2.3 가변 직교곡선 격자망 작성 프로그램

QMESH는 하도의 격자작성을 위해 최적화된 프로

그램이다. QMESH는 절점에서의 직교성에 대해 편미분방정식을 유한차분형태로 이산화 하여 최적의 직교상태를 구하는 형태이며 불규칙한 경계면을 가지는 영역에 대한 직교성을 높이기 위하여 경계선상에서 생성된 절점의 자유로운 이동조건, 수치적 안정성 확보를 위한 단계별 분할기법 및 내부경계조건이 적용되어 있다. 횡단자료, 제방선, 저수로 경계선, 횡단측량의 좌표 자료를 입력함으로써 하도 격자망을 작성하게 된다. 특히 단계별 분할 기법과 직교계산을 할 경우 중형비를 수정하는 보간법이 포함되어 있고, 경계선에서 절점 이동조건 기법이 적용되어 있어 만곡 또는 급곡, 급축이 반복되는 형태의 하천이라도 직교성이 높은 격자망 작성이 가능하다. 직교좌표계 (x, y)상에서 정의된 Laplace 방정식으로 직교곡선 격자망을 구성하며 식은 (9)와 같다. 식 (10a)와 식 (10b) 같이 직교곡선격자를 생성하는 지배방정식은 편미분 방정식으로 표현된다. 식 (11)은 왜곡함수 f 를 정의한 것이며 측도텐서성분 (metric tensor component)은 식 (12a)와 식 (12b)와 같다.

$$\nabla^2 x = 0, \nabla^2 y = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial\xi}\left(f\frac{\partial x}{\partial\xi}\right) + \frac{\partial}{\partial\eta}\left(\frac{1}{f}\frac{\partial x}{\partial\eta}\right) = 0 \quad (10a)$$

$$\frac{\partial}{\partial\xi}\left(f\frac{\partial y}{\partial\xi}\right) + \frac{\partial}{\partial\eta}\left(\frac{1}{f}\frac{\partial y}{\partial\eta}\right) = 0 \quad (10b)$$

$$f = \frac{h_\eta}{h_\xi} \quad (11)$$

$$h_\eta = \sqrt{g_{22}} = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial\eta}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial\eta}\right)^2} \quad (12a)$$

$$h_\xi = \sqrt{g_{11}} = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial\xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial\xi}\right)^2} \quad (12b)$$

여기서, ∇ 는 공변 Laplace 연산자, ξ 와 η 는 2차원 직교곡선좌표계 방향, g_{ii} 는 계량텐서의 반변 성분이다.

2.4 대상하천

낙동강은 한반도 남동부에 위치하며 우리나라 제 2의 하천이다. 유역면적은 남한면적의 25.9%인 23,384.21km², 유로연장은 510.36km이다(국토해양부, 2010). 그중 대상구간인 금호강 합류전 유역의 면적은 전체 유역면적의 49.89%인 11,667.22km²이며, 유로연장은 342.07km이다. 금호강 합류점에서 낙동강의 유역 평균 폭은 34.11km로 산정되어, 대하천의 특성을 가지는 것으로 검토되었다. 그림 1과 같이 대상구간 내에는 상류단에 성주수위표가 위치하며 하류단에 고령교 수위표



그림 1. Study area

가 위치한다. 최심부를 연결한 하도선형은 매우 만곡한 형태를 나타내며 복잡한 지형특성을 나타내고 있다. 내부 주요지점으로는 대상구간 중간 지점에 금호강이 합류하고 있고 금호강 합류 후 화원수위표가 위치하고 있어 관측수위와 계산수위 비교를 통한 수리특성 검토가 가능하다.

2.5 모형구축

그림 2와 그림 3에 제시된 바와 같이 실제 지형을 정확히 재현하기 위해 낙동강의 금호강 유입 지점 일대를 대상으로 20m 간격의 횡단측량자료를 이용하여 3차원 정밀 지형을 구축하였다. 격자분할은 종방향의 경우 수치해석의 정확도를 높이기 위하여 하천의 종방향 형상을 고려하고 유수의 흐름방향과 평행하게 분할하였다. 횡방향은 격자 크기에 따른 지형 재현성을 검토하기 위해 횡단 방향의 분할 개수를 5(Case 1), 10(Case 2), 20(Case 3), 40(Case 4)으로 구분하여 4개 해상도의 격자망을 구성하였다. 격자망의 직교성을 평가하기 위해 average deviation from orthogonality(ADO)와 maximum deviation from orthogonality(MDO)를 이용하였으며 식 (13)~(15)와 같다. 표 1에 분할된 직교곡선 격자망의 정보를 제시하였고 각각 다른 해상도로 구현된 격자 정보에 기 구축된 3차원 지형정보의 보간에 따른 재현

성을 그림 4와 그림 5를 통해 가지적으로 확인할 수 있다. 격자 개수가 많아질수록 지형을 충분히 표현 가능하고, 주수로와 홍수터 사이의 경사와 하천흐름방향의 경사 등 급격한 지형변화로 인해 발생하는 수치계산상의 안정성을 확보할 수 있다.

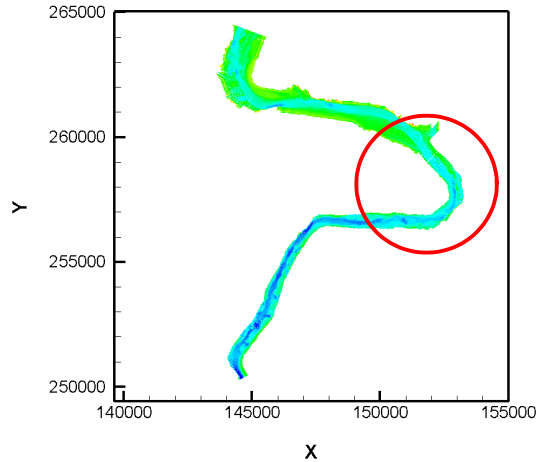


그림 2. Terrain of study area

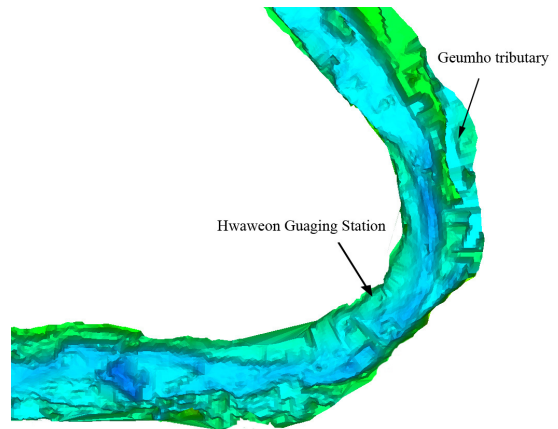


그림 3. A perspective view of the topography

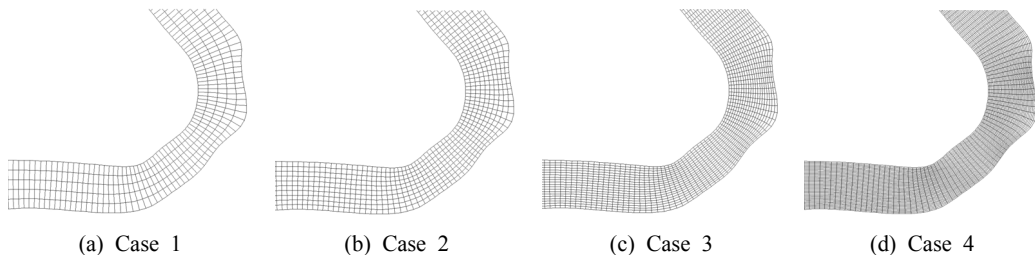


그림 4. Grids resolution

표 1. Grid size and Orthogonality for I and J direction in the each cases

Case		1	2	3	4	
Grid Size	I	MIN(m)	32.84	40.52	41.86	41.35
		J	104.48	94.06	97.56	99.71
	AVE(m)		61.20	61.84	63.66	64.73
	J	MIN(m)	58.51	29.21	15.73	9.04
MAX(m)		268.05	75.20	39.06	19.96	
AVE(m)		134.17	50.11	24.59	13.15	
Orthogonality	ADO	0.66	0.71	0.71	0.70	
	MDO	3.23	3.65	3.77	3.79	

$$ADO = \frac{1}{(ti-2)} \frac{1}{(tj-2)} \sum_2^{ti-1} \sum_2^{tj-1} \max(\theta_{ij}) \quad (13)$$

$$MDO = \max(\theta_{ij}) \quad (14)$$

$$\theta_{ij} = \arccos\left(\frac{g_{12}}{h_{\xi}h_{\eta}}\right)_{ij} \quad (15)$$

여기서, t_i 와 t_j 는 ξ 와 η 방향의 격자의 최대 개수이다.

2.6 모의 조건

CCHE2D와 EFDC 모형을 이용하여 2006년 태풍 “에위니아” 호우사상을 대상으로 실제 관측 유입량에 대한 모형의 수리학적 재현성을 검토하였다. 다양한 유량에 대해서 검증하고 유량에 대한 수위 재현성을 평가하기 위해 부정류 흐름으로 모의하였다. 모의기간은 각각 2006년 7월 9일부터 12일이며 초기 수위는 거리에 따라 선형적으로 분포한다고 가정하였고 각 격자에 적용한 초기 수위는 그림 5와 같다. 조도 및 조고 값은 격자해상도가 가장 높은 Case 4를 선택하여 시산법을 통해 관측값과 오차가 가장 작은 값을 산정하여 적용하였다. 난류해석 모델은 Smagorinski(Smagorinsky, 1963) 방법, Wall slipness 계수는 0.5, Wet/Dry 조건은 0.04

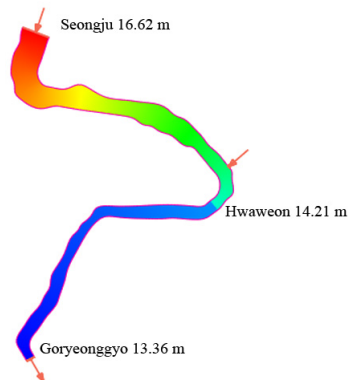


그림 5. Initial water surface conditions

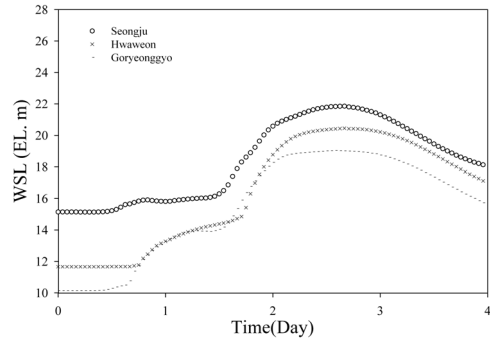


그림 6. Boundary conditions with water level on gauging stations

m, 중력가속도는 9.81m/sec, von Karman 상수는 0.41, 동점성계수는 $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{sec}$ 를 적용하였다. 상류단 경계조건으로는 성주수위표의 관측유량, 하류단 경계 조건은 고령교 수위표의 관측수위를 활용하였으며 상류단 경계조건 및 금호강 지류유입은 성주와 성서수위 표에서 관측된 수위자료를 바탕으로 한국수문조사연보 (2006, 건설교통부)에 제시되어 있는 수위-유량 곡선식을 이용하여 유량으로 환산하여 적용하였다(그림 6).

3. 모의 결과 및 검토

격자 크기에 따른 물리적 지형 재현성을 평가하기 위해 Case별로 면적고도곡선(area-elevation curve)과 구축된 대상구간의 내부 평가지점인 화원수위표가 위치한 단면을 발췌하여 통계 기법으로 분석하였다. 각 Case별 면적고도곡선과 화원수위표 지점 단면은 그림 7과 그림 8에 도시하였으며 모의 결과 및 검토 결과는 표 2에 제시하였다. 고도별 체적 재현성 평가 부분에서는 면적고도곡선을 분석한 결과, Case 4의 RMSE가 9.97m로 산정되어 오차가 가장 작게 나타났다. 추가적으로 기점 수위표인 화원 수위표의 실제 단면과 Case 별 단면을 검토하였다. 화원수위표 단면의 검토는 “에 위니아” 강우 사상으로 지점 최고수위를 기록한 침투 수위를 기준으로 Case별로 통수능을 산정하여 관측 단면과의 절대상대오차(Bias)를 분석한 결과 또한 Case 4가 0.09%로 오차가 가장 작게 나타났다. 따라서, 격자를 더 조밀하게 세분화 하면 실제 지형과 가장 유사하게 재연된다고 볼 수 있다.

격자별로 다른 해상도를 가진 지형은 수리특성을 변화시키기 때문에 지형특성들의 분포를 비교·검토하는 것과 더불어 정밀 수리계산 모형 수행을 통해 수리특성을 가장 잘 반영하는 격자해상도를 예측할 수 있다.

표 2. Estimation of error on the each cases on the Hwaeon gauging station

Estimation		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
number of cells (EA)		2,100	4,200	8,400	16,800
area-elevation curve error (RMSE, m)		64.86	28.27	15.63	9.97
morphological analysis	channel capacity(m ²)	4440.9	4028.1	4015.5	3995.8
	bias (%)	11.04	0.72	0.40	0.09
CCHE2D	Elapsed Time(sec)	200	367	662	1,285
	RMSE (m)	0.474	0.369	0.319	0.315
	NRMSE (%)	5.39	4.20	3.63	3.58
EFDC	Elapsed Time(sec)	707	1,465	3,745	9,012
	RMSE (m)	0.514	0.259	0.254	0.254
	NRMSE (%)	5.71	2.95	2.89	2.89

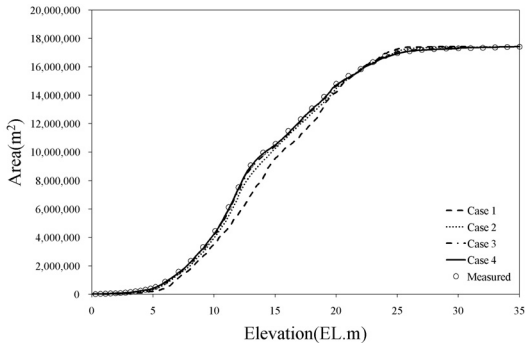


그림 7. Area-Elevation relationship

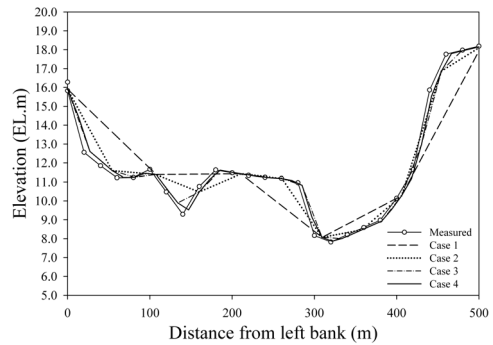


그림 8. Cross-section on the Hwaeon gauging station

각 격자별로 구축된 지형을 CCHE2D와 EFDC 모형의 지형조건으로 적용하여 모의하였으며 수치모형에 의한 계산 결과와 관측 수위와의 오차분석을 위하여 RMSE와 NRMSE를 계산하였다. RMSE와 NRMSE의 산출 식은 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{obs,i} - h_{cal,i})^2} \quad (16)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{(h_{obs,max} - h_{obs,min})} \quad (17)$$

여기서, n : 총 자료 개수, $h_{obs,i}$: 시간 i 에서의 관측 수위, $h_{cal,i}$: 시간 i 에서의 계산수위, $h_{obs,max}$: 최대관측수위, $h_{obs,min}$: 최소관측수위이다.

각 격자별로 분석된 결과는 그림 9, 그림 10과 같다. 모의 결과를 통해 CCHE2D와 EFDC 모형은 하류단 경계 조건에 의해 지배 받고 있음을 알 수 있으며 격자 해상도가 낮을수록 관측 수위보다 계산 수위가 과대 산정되었다. 부분적으로 관측 값과 불일치하는 부분에 대해서는 여러 가지 요인이 있을 수 있는데, 그 원인으로

는 하천형상을 완벽하게 격자망으로 재현할 수 없는 점과 계산에 사용된 금호강 합류부의 유입량 산출에서 발생할 수 있는 오차라고 판단된다.

Case 4로 구성하였을 때 CCHE2D 모형은 RMSE와 NRMSE가 0.315m, 3.58%가 나타났고 EFDC는 RMSE와 NRMSE가 0.254 m, 2.89%로 나타났기 때문에 다른 Case 보다 상대적으로 오차가 작게 나타났다.

하지만, 그림 11에 도시된 바와 같이 Case 1을 기준으로 상대 RMSE ratio를 산정한 결과, CCHE2D 모형은 횡단격자해상도가 10개 이상이 될 경우 계산 값 차이가 작게 나타났고, EFDC 모형은 횡단격자해상도가 10개 이상이 될 경우 계산값 차이가 작게 나타났다. CCHE2D 모형의 총 수행 시간은 평균적으로 Case 1은 3분 20초, Case 2는 6분 07초, Case 3은 11분 02초, Case 4는 21분 25초로 나타났고 EFDC 모형은 Case 1은 11분 47초, Case 2는 24분 25초, Case 3은 62분 25초, Case 4는 150분 12초로 나타났다. 전반적으로 격자가 고해상도로 구성되면서 오차가 작게 나타나지만 격자 개수가 증가함에 따라 모형수행 시간이 많이 걸리므로 내용과 목적, 계산의 효율성 측면에서 적절한 선택이 필요할 것으로 판단된다. 특히, 홍수기 빠른 의사

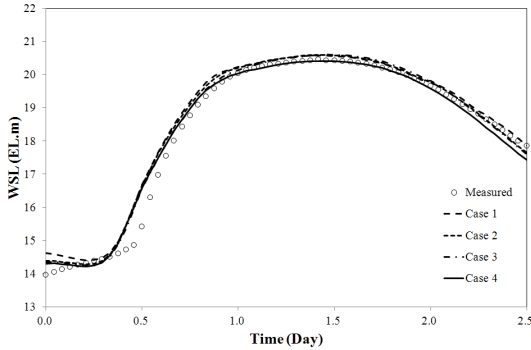


그림 9. Comparison between measured data and calculated result (CCHE2D, Hwaweon)

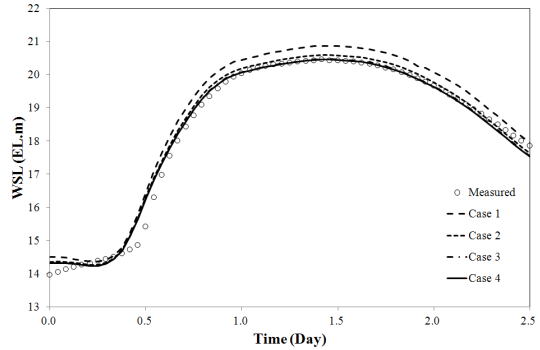


그림 10. Comparison between measured data and calculated result (EFDC, Hwaweon)

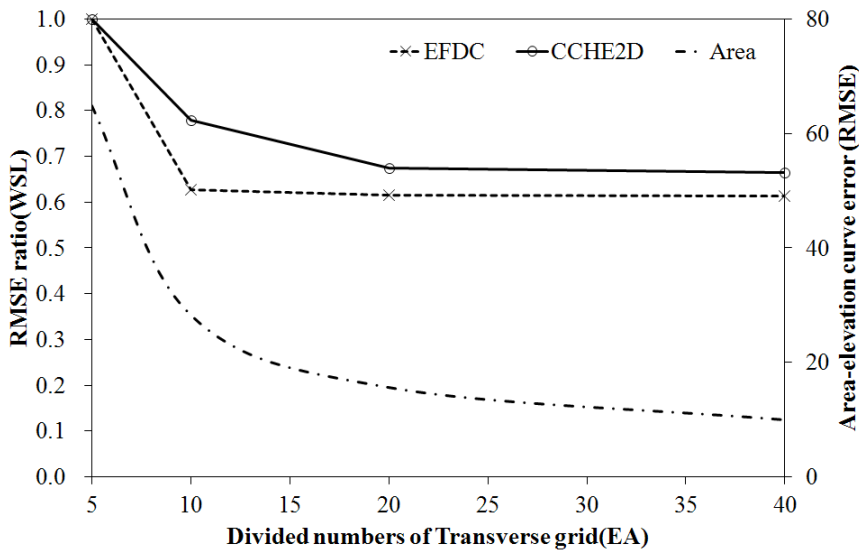


그림 11. Error estimation of morphological analysis and model result on the Hwaweon gauging station

결정을 위한 수치모의를 위해서는 Case 4를 이용하는 것 보다는 시간과 신뢰도를 확보 가능한 Case 2의 해상도로 구축하여 모의하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 낙동강의 금호강이 합류하는 구간을 대상으로 격자 크기에 따른 물리적 지형 재현성 평가와 더불어 CCHE2D와 EFDC 모형을 적용하여 하도의 수리특성을 분석하기 위한 적절한 격자해상도를 산정하는 방법을 연구하였다.

- 1) 격자 크기에 따른 지형 재현성을 검토하기 위해 횡단 방향의 분할을 5, 10, 20, 40으로 구분하여 4개 해상도의 격자망을 구성하였으며 격자 개수

가 많아질수록 지형을 충분히 재현 가능하였다.

- 2) CCHE2D와 EFDC 모형을 이용한 수치모의 결과, Case 4로 구성하였을 때 CCHE2D 모형은 RMSE와 NRMSE가 0.315m, 3.58%가 나타났고 EFDC는 RMSE와 NRMSE가 0.254m, 2.89%로 나타났다.
- 3) 상대 RMSE ratio를 산정한 결과, 격자 해상도가 Case 2 이상이 될 경우 계산 결과의 정확도가 상승하는 정도가 줄어드는 것으로 나타났다. 내용과 목적, 계산의 효율성 측면에서 적절한 격자 해상도의 선택이 필요할 것으로 판단되며 고정밀 수치모의를 위해서는 격자 해상도를 증가시켜 수치모의를 수행해야 하나, 홍수기시 빠른 의사결정과 더불어 적절한 수준의 정확도와 계산시간을 확보

하기 위해서는 Case 2로 구축하는 것이 적절할 것으로 사료된다. 다음과 같은 기법으로 다차원 모형을 구축하여 해당수계에 적용하여 격자해상도를 평가한다면 합리적인 격자해상도 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 강형식, 장재호, 안종호, 김익재, 2011, 유역 모형과 하천 모형의 연계를 통한 낙동강 본류 흐름 예측, 한국수자원학회논문집, 제44권, 7호, pp.577-590.
2. 국토해양부, 2010, 낙동강 하천정비기본계획.
3. 김연수, 장창래, 이기하, 정관수, 2010, CCHE2D 모형을 이용하여 급만곡부의 흐름특성을 분석, 한국방재학회논문집, 한국방재학회, 제10권, 5호, pp.125-133.
4. 이지완, 이미선, 정인균, 박근애, 김성준, 2011, 안성천 중소하천의 하천분류 및 2차원 수리특성-하상변동모의, 한국지리정보학회지, 한국지리정보학회, 제14권, 4호, pp.77-91.
4. 정인주, 안정민, 김상용, 이종출, 2002, DEM에 의한 지형인자 추출에 따른 격자크기의 영향에 관한 연구, 한국지형공간정보학회지, 한국지형공간정보학회, 제10권, 2호, pp.67-75.
5. 지운, 김권한, 여운광, 2011, 하구둑에서의 하폭축소 방법을 이용한 퇴사저감 효과 분석, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제44권, 1호, pp.31-40.
6. 지운, 여운광, 한승원, 2010, 낙동강 하구둑 상류 접근수로에서의 유사량 공식 및 유사 이송형태에 따른 하상변동 수치모의에 관한 연구, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제43권, 6호, pp.543-557.
7. 최용준, 김주철, 2011, 공간해상도에 따른 배수경로길이 및 특성유속의 변화, 한국지형공간정보학회지, 한국지형공간정보학회, 제19권, 3호, pp.107-114.
8. 허영택, 박진혁, 2009, EFDC 모형의 낙동강 하류부 수리해석 적용성 평가, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제42권, 4호, pp.309-317.
9. 허영택, 류경식, 차기욱, 2010, 이동경계조건을 고려한 직교곡선격자 생성 기법 소개, 대한토목학회 학술대회논문집, 대한토목학회, p.2654.
10. Blumberg, A. F., Mellor, G. L., 1987, A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, In Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal and Estuarine Science, American Geophysical Union, Vol.4, pp.1-19.
11. Hamrick, J.M., 1996, A User's Manual for the Environmental Fluid Dynamics Computer Code(EFDC), The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Special Report 331, p.234
12. Jeong Sangman, Yeon Kyusung, Hur Youngteck, Oh Kukryul, 2010, Salinity Intrusion characteristics analysis using EFDC model in the downstream of Geum River, Journal of Environmental Sciences, Vol.22, No.6, pp.934-939.
13. Jia, Y.F. and Wang, S.S.Y., 2001, CCHE2D: Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model for Unsteady Open Channel Flow Over Loose Bed, NCCHE Technical Report, NCCHE-TR-2001-01.
14. Nassar, M.A., 2010, Multi-parametric sensitivity analysis of CCHE2D for channel flow simulations in Nile River, Journal of hydro-environment research, Vol.1, pp.1-9.
15. Smagorinsky, J., 1963, General circulation experiments with the primitive equation, I. The basic experiment, Monthly Weather Review, Vol.91, pp.99-164.