

이차원 수치모형을 이용한 사행하도 흐름모의 Flow Simulation in a Meandering Channel using a 2-dimensional Numerical Model

이해균*, 이남주**

단국대학교 토목공학과*, 경성대학교 토목공학과**

Haegyun Lee(haegyun@dankook.ac.kr)*, Namjoo Lee(njlee@ks.ac.kr)**

요약

낙동강에 위치한 하회마을의 점사주는 상류의 댐에 의해 수량이 조절됨에 따라 토사수리학적 특성이 상당히 변화되었으며, 식생이 발생하는 등 옛 모습을 상실해 가고 있다. 이 연구는 낙동강의 중상류에 위치한 하회지구에 평면 이차원 하상변동 및 수질예측 수치모형인 KU-RLMS 모형을 적용하여 하회마을 앞의 점사주에 영향을 미치는 수리학적 특성 변화를 규명할 목적으로 수행하였다. 평면 이차원 수치모형을 이용한 흐름모의 조건은 고정상 수리모형실험의 실험조건에 대하여 수행하였다. 수치모의 결과 하회마을을 지나면서 부용대 앞의 좌안측에서 흐름이 가속되는 현상이 나타났고, 하회마을 직하류의 우안측에서는 순환이 발생하는 것으로 예측되었다. 이는 수리모형실험 결과와도 일치하는 경향이다. 계획홍수량 흐름조건인 경우 순환현상이 발생하는 하회마을 직하류의 우안측은 유속이 빠른 좌안측보다 약 1.0 m 이상 수위가 상승하는 것으로 예측되었으며, 수리모형실험 결과와도 일치함을 확인할 수 있었다.

■ 중심어 : | 하회지구 | KU-RLMS 모형 | 흐름예측 | 사행하도 |

Abstract

The point sand bars of Hahoi Village on Nakdong River have undergone considerable changes including fluvial and vegetation characteristics due to flood regulation by the dams constructed upstream. In this study, the numerical fluvial/sediment and water quality model, KU-RLMS, is applied to the aquatic area near Hahoi Village (middle/upper region of the Nakdong River) for clarifying the mechanisms of changes in hydraulic and aquatic characteristics. The fixed-bed hydraulic experiment was carried out for horizontal two-dimensional numerical model. The numerical simulation reveals that flow is accelerated near the left bank of Booyongdae downstream of the Hahoi Village area. Circulatory flow pattern was observed at the right bank downstream of Hahoi Village. The simulation was in good agreement with the hydraulic/physical experiment. For the discharge of design flood, at the area of circulatory flow pattern, the superelevation of about 1.0 m at the right bank was predicted compared to the left bank of high flow velocity, which is also in good agreement with hydraulic experiment.

■ keyword : | Hahoi Region | KU-RLMS Model | Flow Prediction | Meandering Channel |

1. 서론

하회마을은 한국 전통가옥의 미가 살아 숨 쉬는 곳으로, 하회(河回)라는 지명은 낙동강물이 동쪽으로 흐르

다가 S자형을 이루면서 마을을 감싸 도는 데서 유래했다. 낙동강 수계에서 내성천에 위치한 예천의 회룡포와 영주의 무섬마을 역시 마을 앞에 위치한 깨끗한 백사장으로 널리 알려진 관광명소로서 지금도 깨끗한 모래 사

* 이 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비지원 (과제번호# '08지역기술혁신 B-01)에 의해 수행되었습니다.

접수번호 : #120926-004

접수일자 : 2012년 09월 26일

심사완료일 : 2013년 04월 24일

교신저자 : 이남주, e-mail : njlee@ks.ac.kr

주를 유지하고 있다. 그렇지만, 하회마을 앞 백사장은 십수년전부터 사주에 식생이 번식하는 등 과거에는 없던 현상이 발생하고 있으며, 이미 수차례 사주에 발생한 식생을 인위적으로 제거한 바 있다.

하회마을과 회룡포 및 무섬마을의 중요한 차이점으로 대규모의 인위적인 하천구조물을 생각할 수 있다. 내성천에는 소규모 농업용 저수지 이외의 저류시설이 없는 반면, 낙동강 본류에 위치한 하회마을 상류에는 안동다목적댐과 임하다목적댐이 위치한다. 낙동강은 상류로 부터의 토사공급이 상당히 많은 하천으로써, 이로 인한 미지형의 변화가 많이 발생하는 하천이다. 하회마을 식생의 주요 원인으로는 대규모 저수지(안동호와 임하호) 건설로 인해 상류로 부터의 토사 공급이 현저히 줄어들었고, 흐름 역시 댐에 의해 조절됨에 따른 전단응력의 변화를 생각할 수 있다.

유사이동모형은 적용가능영역 또는 모형의 차원에 따라 1, 2, 3차원 모형으로 구분된다. 하천에서의 유사이동 해석에는 주로 1차원 모형을 사용하고 있으며, 하구, 호수 등의 영역에서 부유사 농도의 연직분포가 주요 관심사항일 경우는 연직 2차원 모형을 사용한다. 연안, 하구, 항만, 호수 등과 같은 영역에서의 평면적인 유사이동문제 해석에는 평면 2차원 또는 3차원 유사이동 모형을 사용한다. 하천에서도 사행현상 규명, 수리구조물과 관련된 국부세굴 또는 수세현상 규명을 위해서는 평면 2차원 또는 3차원 유사이동모형이 사용되기도 한다[5][6][16].

이차원 유사이동모형은 평면 2차원 모형과 연직 2차원 모형으로 구분할 수 있으며, 1980년대부터 본격적으로 연구개발이 시작되었다. 이남주와 이길성(1998a)은 수심적분된 평면 2차원 유사이동모형의 개발연혁, 모형 특성 및 적용사례를 연도순으로 정리하고 특성을 비교하였다. 국내에서 하천 유사이동 해석에 적용된 수치모형은 외국에서 개발된 RMA2[9]/SED2D[15], FESWMS-FST2DH[10], CCHE2D[12] 모형 등이 있으며, 국내에서 개발된 모형은 RAMS[1], KU-RLMS[4] 등이 있다. 이종석과 송중근[7]은 식생이 하천 흐름에 미치는 영향을 검토하기 위해 1차원 HEC-RAS 모형과 2차원 RMA-2 수치모형을 이용하여 홍수위 안정성 분석을

수행하한 바 있다.

여홍구 등[2]은 흐름 해석 방법, 대상 유사의 다양성, 유사량 공식의 다양성, 유사 입경별 모의, 장감화 모의, 수공구조물, 준설, 조합된 계산, 미지형 변화 예측, 원시코드 수정 가능 여부 등을 평면 이차원 하상변동 수치모형의 선정 지침으로 제시한 바 있다. 이 연구에서는 여홍구 등(2006)이 제시한 선정지침을 모두 만족하며, 특히 조합된 계산, 미지형 변화 예측, 원시코드 수정이 가능한 KU-RLMS 모형을 선정하였다.

이 연구는 낙동강의 중상류에 위치한 하회지구에 평면 이차원 하상변동 및 수질예측 수치모형인 KU-RLMS 모형[4]을 적용하여 하회마을 앞에 위치한 점사주의 지형변화를 예측하고, 자연하천 만족하도 지형변화에 대한 수치모형의 적용성을 검토할 목적으로 수행하였다.

II. KU-RLMS 흐름 모형

1. 지배방정식

KU-RLMS 모형은 1996년에 개발된[5][6] 평면 이차원 비정상 흐름, 이송확산, 하상변동 예측모형으로 잠김-드러남(wetting-drying), 식생에 의한 흐름저항 등을 고려할 수 있는 좌표변환기법을 사용하는 유한차분 수치모형이다. KU-RLMS 모형의 흐름 계산에는 다음과 같은 수심적분된 천수방정식을 사용한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hU) + \frac{\partial}{\partial y}(hV) = 0 \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(hU) + \frac{\partial}{\partial x}(hU^2) + \frac{\partial}{\partial y}(hUV) \\ & = FhV - gh \frac{\partial}{\partial x}(h + z_b) + \frac{1}{\rho}(\tau_{w1} - \tau_{b1}) \\ & + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{11}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{12}) \end{aligned} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(hV) + \frac{\partial}{\partial x}(hUV) + \frac{\partial}{\partial y}(hV^2) \\ & = -FhU - gh \frac{\partial}{\partial y}(h + z_b) + \frac{1}{\rho}(\tau_{w2} - \tau_{b2}) \\ & + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{12}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{22}) \end{aligned} \quad (1c)$$

여기서, x, y 는 수평면상의 공간좌표, t 는 시간, F 는 Coriolis 상수, g 는 중력가속도, h 는 수심, z_b 는 하상고, ρ 는 물의 밀도이며, U 와 V 는 방향의 수심평균 유속성분, τ_{b1} 과 τ_{b2} 는 각각 방향의 바닥 전단응력, τ_{w1} 과 τ_{w2} 는 각각 방향의 바람에 의한 응력, T_{11}, T_{12}, T_{22} 는 유효응력이다. 유체의 난류유동에 기인한 난류 확산항은 Ponce and Yabusaki(1981) 방법[17]을 사용하여 유효 전단응력을 간접적으로 고려한다.

2. 직교곡선격자 생성

격자생성은 다음과 같은 타원형 격자생성 Poisson 방정식을 사용한다.

$$\begin{aligned} \xi_{xx} + \xi_{yy} &= P(\xi, \eta) \\ \eta_{xx} + \eta_{yy} &= Q(\xi, \eta) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, ξ 와 η 는 계산좌표축이며, P 와 Q 는 제어함수이다. 식 (2)를 좌표변환한 변환결과는 다음과 같다[11].

$$g_{22}x_{\xi\xi} - 2g_{12}x_{\xi\eta} + g_{11}x_{\eta\eta} = -J^2(Px_{\xi} + Qx_{\eta}) \quad (3a)$$

$$g_{22}y_{\xi\xi} - 2g_{12}y_{\xi\eta} + g_{11}y_{\eta\eta} = -J^2(Py_{\xi} + Qy_{\eta}) \quad (3b)$$

여기서, g_{11}, g_{12}, g_{22} 는 매트릭 텐서 \mathbf{g} 의 성분이며, J 는 변환 자코비안이다. 유연성과 직교성을 고려하기 위해 다음과 같은 Ryskin-Leal 제어함수[18]를 사용한다.

$$P = \frac{1}{\sqrt{g_{11}g_{22}}} \frac{\partial f}{\partial \xi}, \quad Q = \frac{1}{\sqrt{g_{11}g_{22}}} \frac{\partial f}{\partial \eta} \quad (4)$$

여기서, f 는 비틀림함수(distortion function)로 다음과 같다.

$$f = \sqrt{g_{22}/g_{11}} \quad (5)$$

Poisson 방정식 (4)에 직교성을 도입하면 직교격자생

성 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sqrt{g_{11}g_{22}} \text{DEL}^2 x &= 0 \\ \sqrt{g_{11}g_{22}} \text{DEL}^2 y &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, 2차원 covariant Laplace 연산자 ∇^2 은 다음과 같이 정의된다.

$$\nabla^2 \equiv \frac{\frac{\partial}{\partial \xi} \left(f \frac{\partial}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(f^{-1} \frac{\partial}{\partial \eta} \right)}{\sqrt{g_{11}g_{22}}} \quad (7)$$

직교격자생성 지배방정식의 해는 point SOR 기법을 사용하여 구하였다.

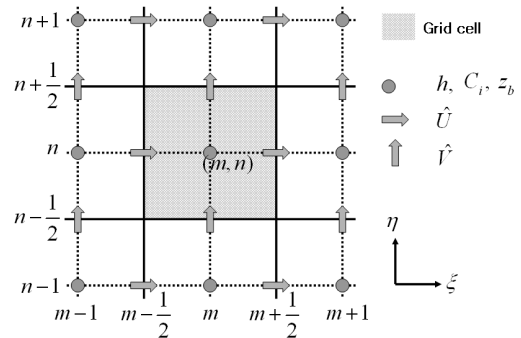


그림 1. Finite difference grid cell

좌표변환한 지배방정식을 [그림 1]에서 도시한 것과 같은 Arakawa-C 형태의 엇갈린 격자계(staggered grid)에서 Leendertse 방법[14]을 이용하여 유한차분 하였으며, ADI 방법으로 해를 구한다.

III. 수치모형의 검증

실험수로의 수위측정 및 수치실험 자료[13]를 사용하여 본 연구에서 개발한 흐름모형을 검증하였다. 모형실험 수로는 폭이 1.7 m인 만곡수로로 상류 직선부, 반원형 수로, 하류 직선부로 구성되어 있으며, 수로의 형상은 [그림 2]와 같다. 상류경계에서 유입되는 유량은

0.187 m³/s, 하류경계의 수심은 0.18 m이며, 수로 바닥 경사는 없다. 실험수로의 Chézy 계수는 매끄러운 단면의 값인 57 m^{1/2}/s로, c_f 는 0.003에 해당한다.

[그림 2]는 만곡수로의 좌표계와 좌표변환기법을 사용하여 생성한 직교곡선좌표계이다. ξ 및 η 방향 격자의 개수는 각각 10, 20개이며, $\Delta\xi$ 와 $\Delta\eta$ 는 모두 1을 사용하였다. 완화계수를 1로 하고 257 회 반복계산하여 직교곡선격자를 생성하였다.

시간격자간격 $\Delta\tau$ 는 수치안정조건을 고려하여 0.001 s를 사용하였다. 수치모의 결과로 부터 얻은 유속분포는 [그림 3]과 같다. 계산결과에 따르면 흐름은 만곡부가 시작되는 부분에서는 내측의 유속이 크며, 만곡부의 중간부분에서는 내측과 외측의 유속차가 거의 없고, 만곡부가 끝나는 부분에서는 외측의 유속이 내측보다 다소 커짐을 볼 수 있으며, 이런 현상은 Kuipers and Vreugdenhil의 유속 측정결과[13]와 일치하는 경향을 보이고 있다. [그림 4]는 실험수로를 따라 수위변화를 실험치와 직사각형 격자를 사용한 Kuipers and Vreugdenhil의 유한차분모형의 수치결과[13] 및 이 연구에서 개발한 수치모형의 결과를 비교한 그림이다. 수로 내측의 수위 계산결과는 만곡부에서 실험결과보다 다소 작게 나타나고 있다. 수로 외측에서는 만곡부에서는 관측치와 잘 일치하지만, 수위가 감소하기 시작하는 지점이 관측치보다 상류부에 위치하고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 직사각형 격자를 사용한 유한차분모형보다는 계산결과가 우수함을 확인할 수 있다.

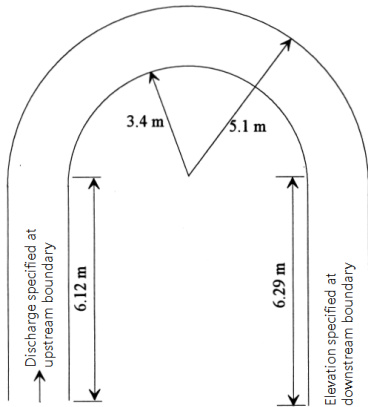


그림 2. Bended open-channel for verification

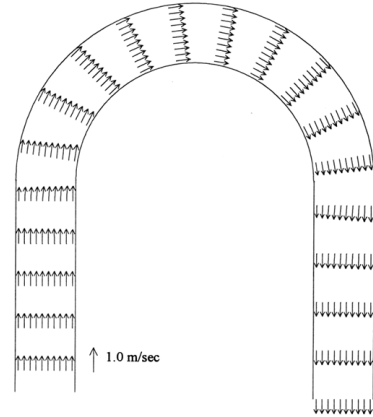


그림 3. Velocity distribution

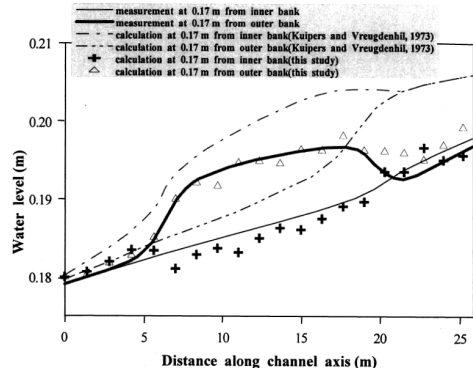


그림 4. Numerical modeling result and comparison

IV. 수치 모의 실험

1. 수치모형 입력자료 구성

연구대상 지역인 하회지구 인근에 위치한 단면의 번호는 [그림 5]에서 보는 바와 같다. 수치격자는 [그림 6]과 같이 20 × 270 개의 엇갈린 격자로 구성하였다. 그림의 계산격자망에서 공간격자 간격은 $\Delta\xi = \Delta\eta = 200$ 인 격자를 사용하였다. [그림 5]는 수치모형에서 사용한 지형 자료를 도시한 것이다. 정상류 흐름을 계산하기 위한 시간격자간격 Δt 는 0.5 s를 사용하였다. 직교곡선격자 발생을 위한 SOR 방법의 완화계수는 0.1을 사용하였다. 물의 밀도는 1,000 kg/m³, 동점성계수는 1.139×10^{-6} m²/s를 사용하였다. 적용구간의 Manning 계수는 0.035

을 사용하였다.

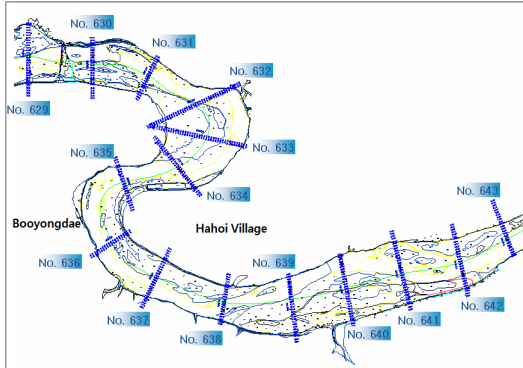


그림 5. River stations near Hahoi Village

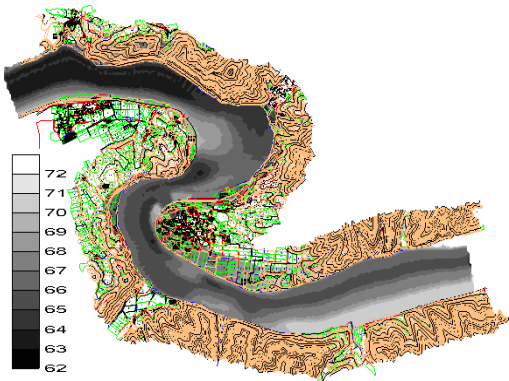


그림 6. River bottom elevation data (EL. m)

2. 평면 이차원 흐름 모의

평면 이차원 수치모형을 이용한 흐름모의 조건은 고정상 수리모형실험[8]의 실험조건 [표 1]에 대하여 수행하였다. 모의조건 F-I은 설계홍수량에 대한 흐름모의 조건이며, F-II는 저수로의 만제유량 개념에 따른 흐름모의조건으로 선정하였다.

표 1. Numerical modeling conditions

조건	유량 (m ³ /s)	기점(No.629) 수위 (El. m)	비고
F-I	7,330	70.73	설계홍수량 (2005.12.19)
F-II	2,000	67.35	저수로 만제유량 개념 (2005.12.20)

한국건설기술연구원[8]은 [표 1]의 조건에 대하여 고정상 실험과 이동상 실험을 통해 흐름과 지형변화를 분석하였다. 이 연구에서는 한국건설기술연구원[8]의 고정상 및 이동상 실험 결과와 수치모의 결과를 비교하여 수치모형의 적용성을 확인하였다.

[그림 7]은 [표 1]의 모의조건별 정상류 흐름계산 결과로서 유속장을 도시한 것이다. [그림 7](a)는 설계홍수량(모의조건 F-I)에 대한 수치모의 결과이며, [그림 7](b)는 저수로 만제유량(모의조건 F-II)에 대한 수치모의 결과이다. 수치모형의 적용구간 상류부에서 흐름장이 등분포 유속으로 나타나는 이유는 상류 경계조건의 영향이며, 이 영향은 하회마을 상류에 도달하기 이전에 실제 흐름과 유사한 형태로 재현되므로 수치계산에 무리는 없다고 판단된다.

설계홍수량(모의조건 F-I)과 저수로 만제유량(모의조건 F-II)에 대한 모의결과를 살펴보면, 전체적으로 유속은 설계유량일 경우가 2~3배 정도 큰 것으로 예측되었다. 그렇지만 두 경우 흐름장의 전반적인 형태는 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

설계홍수량(모의조건 F-I)에 대한 수치모의 결과를 보면 주흐름이 하회마을을 지나면서 부용대 직하류의 좌안 사주를 통과하는 것으로 수치모의되었으며, 이와 같은 특징은 수리모형실험 결과와 잘 부합된다. 또한 저수로가 위치하는 부용대 직하류에 위치한 만곡부의 우안측에서는 순환류가 발생하는 것으로 나타났으며, 이 역시 수리모형실험 결과와 잘 부합되는 결과이다. 고유량시에 순환류가 발생하는 이유는 주흐름은 부용대 직하류의 좌안 사주를 통과하여 하류로 진행하고 우안측에는 수심이 깊은 정체수역이 형성되기 때문이다.

저수로 만제유량(모의조건 F-II)에 대한 수치모의 결과를 보면 주흐름이 하회마을을 지나면서 부용대 직하류의 좌안 사주를 통과하기는 하지만, 설계홍수량의 경우보다는 다소 우안쪽을 통과하는 것으로 나타났다. 따라서, 설계홍수량의 경우에는 저수로가 위치하는 부용대 직하류에 위치한 만곡부의 우안측에서는 순환류가 발생하는 것으로 나타났지만, 유량이 작은 저수로 만제유량의 경우에는 순환현상이 거의 발생하지 않는 것으로 수치모의되었다.

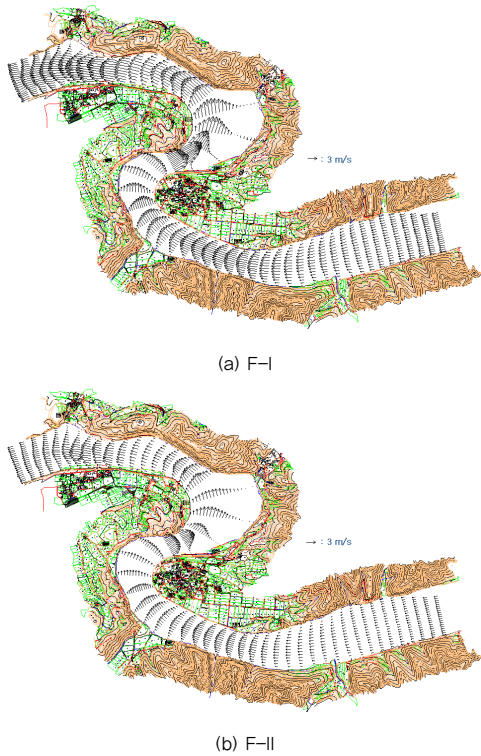


그림 7. Flow simulation result (velocity, m/s)

[그림 8]은 [표 1]의 모의조건별 정상류 흐름계산 결과로서 수위 분포를 도시한 것이다. [그림 8](a)는 설계홍수량(모의조건 F-I)에 대한 수치모의 결과이며, [그림 8](b)는 저수로 만제유량(모의조건 F-II)에 대한 수치모의 결과이다. 설계홍수량(모의조건 F-I)과 저수로 만제유량(모의조건 F-II)에 대한 수위 계산결과를 살펴보면, 전체적인 수위 변화 경향은 두 경우 모두 유사한 것으로 나타났다.

설계홍수량(모의조건 F-I)에 대한 수위 수치모의 결과를 보면, 주흐름이 나타나는 하회마을 앞 우안 사주와 부용대 직하류 좌안 사주의 수위보다 정체수역이 형성되는 반대편의 수위가 높게 나타나는 것으로 예측되었다. 이와 같은 현상은 유량이 큰 설계홍수량에 대한 모의조건 F-I이 저수로 만제유량에 대한 모의조건 F-II보다 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 이는 수리모형실험 결과와도 잘 일치하는 경향이다. F-I 흐름조건의 경우 순환현상이 발생하는 하회마을 직하류의

우안측은 유속이 빠른 좌안측보다 약 1m 이상 수위가 상승하는 것으로 예측되었으며[그림 8], 이 역시 수리모형실험 결과와도 일치하는 결과이다.

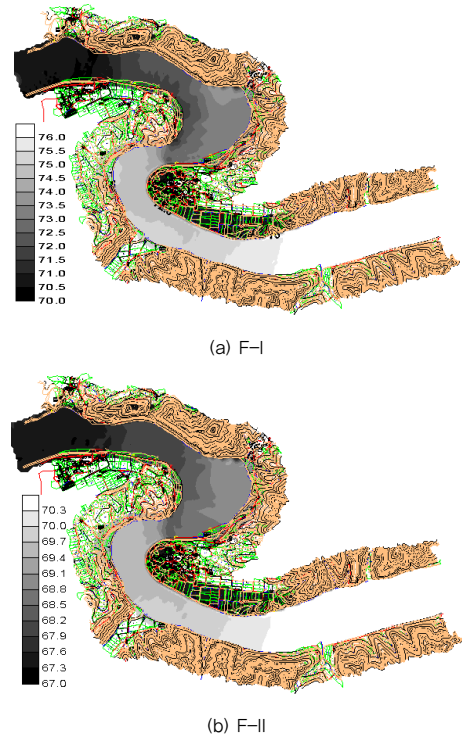


그림 8. Flow simulation result (elevation, EL, m)

V. 결론

하회마을의 점사주의 경우 낙동강 상류에 안동 및 임하 다목적댐이 건설되면서, 수량이 조절됨에 따라 토사 수리학적 특성이 상당히 변화되었으며, 식생이 발생하는 등 옛 모습을 상실해 가고 있는 지역이다. 이 연구는 평면 이차원 하상변동 및 수질예측 수치모형인 KU-RLMS 모형을 하회마을 인근에 적용하여 이차원적 변화 특성을 규명하며, 수치모의 결과를 통해 이동상 수리모형실험에 대한 기초자료를 제공할 목적으로 수행하였다. 평면 이차원 수치모형을 이용한 흐름모의 조건은 고정상 수리모형실험의 실험조건에 대하여 수

행하였다. 수치모의 결과 하회마을을 지나면서 부용대 앞의 좌안측에서 흐름이 가속되는 현상이 나타났고, 하회마을 직하류의 우안측에서는 순환이 발생하는 것으로 예측되었다. 이는 수리모형실험 결과와도 일치하는 경향이다. F-I 흐름조건의 경우 순환현상이 발생하는 하회마을 직하류의 우안측은 유속이 빠른 좌안측보다 약 1m 이상 수위가 상승하는 것으로 예측되었으며, 이 역시 한국건설기술연구원[8]의 고정상 및 이동상 수리모형실험 결과와도 일치하는 결과이다.

자연하천의 하상변동 현상을 보다 잘 재현하기 위해서는 잠김/드러남 기법을 사용하고 비정상 흐름 조건을 사용한 수치모델링이 필요하다. 또한 수치모형을 사용한 3차원적 해석 역시 중요한 연구 주제가 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] 김유진, 서일원, “국내 최초의 범용 2차원 하천해석 소프트웨어(RAMS) 개발”, 물과 미래, 한국수자원학회, 제42권, 제9호, pp.29-35, 2009.

[2] 여홍구, 이남주, 전승훈, 김성한, *폐천 및 구하도 보전, 복원기술, 기술보고서, ER1-2-2-1, 자연과 함께하는 하천복원 기술개발 연구단, 2006.*

[3] 이길성, 이남주, 오성택, *유사이동모형을 이용한 잠실수중보 주변 하상변동의 수치모의, 수공학연구실, 서울대학교 토목공학과, 1994.*

[4] 이남주, “KU-RLMS 모형의 잠김-드러남 기법 적용성 평가”, 한국콘텐츠학회논문지, 제11권, 제4호, pp.448-457, 2011.

[5] 이남주, 이길성, “좌표변환에 의한 이차원 유사이동모형(I) - 모형의 개발”, 대한토목학회논문집, 제18권, 제II-5호, pp.407-412, 1998a.

[6] 이남주, 이길성, “좌표변환에 의한 이차원 유사이동모형(II) - 모형의 적용”, 대한토목학회논문집, 제18권, 제II-5호, pp.423-436, 1998b.

[7] 이종석, 송중근, “하천유형별 식생모델의 홍수위 분석,” 한국콘텐츠학회논문지, 제10권, 제11호,

pp.452-460, 2010.

[8] 한국건설기술연구원, 낙동강 하회지구 하상변동 특성 및 안정화 기법에 관한 연구 보고서, 건설교통부, 2007.

[9] B. P. Donnel, J. V. Letter, and W. H. McAnally, *User's guide to RMA2 WES Version 4.5*, U.S. Army Engineering Research and Development Center, Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory, 2006.

[10] D. C. Froehlich, *User's Manual for FESWMS FST2DH, Two-dimensional Depth-averaged Flow and Sediment Transport Model*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1989.

[11] K. A. Hoffmann and S. T. Chiang, *Computational Fluid Dynamics for Engineers*, Engineering Education System, 1993.

[12] Y. Jia and S. Wang, *CCHE2D: Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model for Unsteady Open Channel Flows over Loose Bed*, National Center for Computational Hydroscience and Engineering, Technical Report No. NCCHE-TR-2001-1, 2001.

[13] J. Kuipers and C. B. Vreugdenhil, *Calculation of Two-Dimensional Horizontal Flow*, Delft Hydraulic Lab., 1973.

[14] J. J. Leendertse, *Aspects of a Computational Model for Long-Period Water-Wave Propagation*, U.S. Air Force Project, RAND Memorandum RM 5294, The Rand Cooperation, 1967.

[15] J. V. Letter, L. C. Roig, B. P. Donnell, W. A. Thomas, W. H. McAnally, and S. A. Adamec, *Users guide to SED2D-WES, a Generalized Computer Program for Two-dimensional Vertically Averaged Sediment Transport*, U.S. Army Corps of Engineers. Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory, 1998.

[16] N. R. B. Olsen and M. C. Melaaen, M.C.,

"Three-Dimensional Calculation of Scour Around Cylinders," J. of Hyd. Eng., ASCE, Vol.119, No.9, pp.1048-1054, 1993.

[17] V. M. Ponce and S. B. Yabusaki, "Modeling Circulation in Depth-averaged Flow," J. of the Hydraulics Div. ASCE, Vol.107, No.HY11, pp.1501-1518, 1981.

[18] G. Ryskin and L. C. Leal, "Orthogonal Mapping," J. of Computational Physics, Vol.50, pp.71-100, 1983.

저 자 소 개

이 해 균(Haegyun Lee)

정회원



- 1995년 2월 : 서울대학교 토목공학
학과(공학사)
- 2007년 7월 : 미국 아이오와 대
학교 토목환경공학과(공학박사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 단국대학
교 토목환경공학과 교수

<관심분야> : 하천공학, 유한요소법, 전산유체역학

이 남 주(Namjoo Lee)

종신회원



- 1987년 2월 : 연세대학교 공과대
학 토목공학과(공학사)
- 1989년 2월 : 서울대학교 대학원
토목공학과 토목전공(공학석사)
- 1993년 8월 : 서울대학교 대학원
토목공학과 토목전공(공학박사)

▪ 1997년 3월 ~ 현재 : 경성대학교 토목공학과 교수

<관심분야> : 하천공학, 수치모델링