

KU-RLMS 모형을 이용한 낙동강 하회지구 흐름 예측에 관한 연구

A Study on the Prediction of Flow on Hahoi Region
in the Nakdong River by Using the KU-RLMS Model

이남주*, 황승용**, 이삼희***

Nam Joo Lee, Seung-Yong Hwang, Samhee Lee

요 지

낙동강에 위치한 하회마을의 점사주는 상류에 안동 및 임하 다목적댐이 건설되면서, 수량이 조절됨에 따라 토사수리학적 특성이 상당히 변화되었으며, 식생이 발생하는 등 옛 모습을 상실해 가고 있는 지역이다. 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.

KU-RLMS 모형은 하천 및 저수지의 국부적인 수리, 수질, 유사이동 해석을 위해 개발된 평면 이차원 비정상 수치모형이다. 직사각형 격자를 사용하는 유한차분법의 단점을 보완하기 위해, 흐름 계산을 위한 지배방정식은 3차원 Reynolds 방정식으로부터 수심 적분된 2차원 연속방정식과 운동량방정식을 불규칙한 경계를 현실적으로 묘사할 수 있는 직교곡선 좌표계로 변환한 방정식을 사용한다. 안동다목적댐과 임하다목적댐의 방류량, 수공구조물 설치 여부 등을 고려하여 수치모의조건을 결정하였으며, 각 조건에 대한 흐름 변화특성을 분석하였다.

핵심용어: 낙동강, 하회지구, KU-RLMS, 흐름예측, 매개변수추정

1. 서 론

하회마을은 한국 전통가옥의 미가 살아 숨 쉬는 곳으로, 하회(河回)라는 지명은 낙동강물이 동쪽으로 흐르다가 S자형을 이루면서 마을을 감싸 도는 데서 유래했다. 동일한 낙동강 수계에서 내성천에 위치한 예천의 회룡포와 영주의 무섬마을 역시 마을 앞에 위치한 깨끗한 백사장으로 널리 알려진 관광명소로서 지금도 깨끗한 모래 사주를 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 건설로 인해 상류로 부터의 토사 공급이 현저히 줄어들었고, 흐름 역시 댐에 의해 조절됨에 따른 전단응력의 변화를 생각할 수 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.

* 정회원 : 경성대학교 건설환경공학부 부교수 · E-mail: njlee@ks.ac.kr
** 정회원 : 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 · E-mail : syhwang@kict.re.kr
*** 정회원 : 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원 · E-mail : samhee.lee@kict.re.kr

2. KU-RLMS 흐름모형

KU-RLMS 모형은 1996년에 의해 개발된 평면 이차원 하상변동 예측모형으로서, 직교곡선격자계로 좌표변환된 유한차분기법을 사용한다. 이 모형은 점착성 및 비점착성 유사를 종류별로 수치모의할 수 있으며, 정상/비정상 흐름 계산, 수문/수증보 등과 같은 수공구조물을 고려할 수 있다. 직교좌표계에서 Reynolds 방정식을 수심적분하면 흐름모형의 지배방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다(이남주, 1996).

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(h U) + \frac{\partial}{\partial x}(h U^2) + \frac{\partial}{\partial y}(h U V) \\ = Fh V - gh \frac{\partial}{\partial x}(h + z_b) + \frac{1}{\rho}(\tau_{w1} - \tau_{bl}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}(h T_{11}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}(h T_{12}) \end{aligned} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(h V) + \frac{\partial}{\partial x}(h U V) + \frac{\partial}{\partial y}(h V^2) \\ = -Fh U - gh \frac{\partial}{\partial y}(h + z_b) + \frac{1}{\rho}(\tau_{w2} - \tau_{l2}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}(h T_{12}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}(h T_{22}) \end{aligned} \quad (1c)$$

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, V 는 x, y 방향의 수심평균 유속성분, τ_{bl} 과 τ_{l2} 는 각각 x, y 방향의 바닥 전단응력, τ_{w1} 과 τ_{w2} 는 각각 x, y 방향의 바람에 의한 응력, T_{11}, T_{12}, T_{22} 는 유효응력이다. 유체의 난류유동에 기인한 난류 확산항은 매 $\Delta t/2$ 동안의 계산이 끝난 후 u 와 v 를 각각 다음과 같이 공간평균하는 수치기법(Ponce and Yabusaki, 1981)을 사용하여 유효전단응력을 간접적으로 고려하였다.

$$\bar{u} = u(1-\alpha) + (\alpha/4)(u_E + u_W + u_S + u_N), \quad \bar{v} = v(1-\alpha) + (\alpha/4)(v_E + v_W + v_S + v_N) \quad (2)$$

여기서 ‘-’는 공간평균된 값을 의미하며, 하첨자 N, S, W, E가 붙은 유속은 고려되고 있는 점을 중심으로 각각 상, 하, 좌, 우에 인접해 있는 점의 유속을 의미한다.

편미분방정식을 사용하는 격자생성기법 중 모형의 적용경계가 명확히 규정된 경우에 일반적으로 많이 사용되는 타원형 방정식을 사용한다. 격자생성시 직교성, 밀집성 등은 Poisson 방정식의 비제차항에 적당한 제어함수를 도입하는 방법으로 고려할 수 있다. 타원형 격자생성 Poisson 방정식은 다음과 같다.

$$\xi_{xx} + \xi_{yy} = P(\xi, \eta), \quad \eta_{xx} + \eta_{yy} = Q(\xi, \eta) \quad (3)$$

수치 연산을 위해 지배방정식을 직교좌표계로 좌표변환하였으며, 유한차분은 Arakawa-C 형태의 엇갈린 격자계에서 Leendertse(1967) 방법을 이용하였다. ADI 방법에 의한 흐름모형과 이송확산방정식의 차분식은 3중 대각행렬로 구성되고, 이것은 Thomas 알고리듬을 이용하여 해를 구한다.

3. KU-RLMS 모형의 적용

3.1 적용 조건

수치격자는 그림 1과 같이 20×270 개의 엇갈린 격자로 구성하였다. 그림의 계산격자망에서 공간격자 간격은 $\Delta\xi = \Delta\eta = 200$ 인 격자를 사용하였다. 그림 2는 수치모형에서 사용한 지형자료를 도시한 것이다. 정상류 흐름을 계산하기 위한 시간격자간격 Δt 는 0.5 s를 사용하였다. 직교곡선격자 발생을 위한 SOR 방법의 완화계수는 0.1을 사용하였다. 물의 밀도는 $1,000 \text{ kg/m}^3$, 동점성계수는 $1.139 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 를 사용하였다. 적용구간의 Manning 계수는 다음과 같은 식 (4)를 사용하여 산정하였다.

$$n = r_1/H^{r_2} + r_3 \exp(-H/r_4) \quad (4)$$

여기서, 상수 r 의 기본값은 표 1과 같으며, 본 연구에서는 Mississippi River 조건을 사용하였다.

3.2 적용 결과

평면 이차원 수치모형을 이용한 흐름모의 조건은 고정상 수리모형실험의 실험조건 표 2에 대하여 수행하

였다. 그림 3은 표 2의 모의조건별 정상류 흐름계산 결과로서 유속장을 도시한 것이며, 그림 4는 수위 계산 결과를 도시한 것이다. 계산 결과 그림 3에서 나타나듯이 하회마을을 지나면서 부용대 앞의 좌안측에서 흐름이 가속되는 현상이 나타났고, 하회마을 직하류의 우안측에서는 순환이 발생하는 것으로 예측되었으며 유량이 큰 경우(F-I) 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이는 한국건설기술연구원의 2006년 수리모형실험 결과와도 일치하는 경향이다. F-I 흐름조건의 경우 순환현상이 발생하는 하회마을 직하류의 우안측은 유속이 빠른 좌안측보다 약 1 m 이상 수위가 상승하는 것으로 예측되었으며(그림 4), 이 역시 수리모형실험 결과와 부합하는 현상이다. 이러한 결과로 부용대 앞의 좌안측에서는 침식이 예상되며, 하회마을 직하류의 우안부근에서는 퇴적이 발생할 것으로 예상할 수 있다.

4. 결 론

하회마을의 점사주는 낙동강 상류에 안동 및 임하 다목적댐이 건설되면서, 수량이 조절됨에 따라 토사수리학적 특성이 상당히 변화되었으며, 식생이 발생하는 등 옛 모습을 상실해 가고 있는 지역이다. 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.

수리모형실험의 실험조건에 대하여 KU-RLMS 모형을 이용하여 흐름을 예측하였다. 하회마을을 지나면서 부용대 앞의 좌안측에서 흐름이 가속되는 현상이 나타났고, 하회마을 직하류의 우안측에서는 순환이 발생하는 것으로 예측되었다. 순환현상이 발생하는 하회마을 직하류의 우안측은 유속이 빠른 좌안측보다 약 1 m 이상 수위가 상승하는 것으로 예측되었으며, 이 현상들은 수리모형실험 결과와 잘 일치하는 경향을 보였다.

참 고 문 헌

1. 이남주 (1996). 좌표변환에 의한 이차원 유사이동모형의 개발 및 적용. 공학박사 학위논문, 서울대학교 토목공학과.
2. EMRL (2002) SMS Surface Water Modeling System Tutorial, Version 8.0. Brigham Young University, pp. 2-1~2-20.
3. Leendertse, J. J. (1967). *Aspects of a Computational Model for Long-Period Water-Wave Propagation*, U. S. Air Force Project, RAND Memorandum RM 5294, The Rand Cooperation.
4. Ponce, V. M., and Yabusaki, S. B. (1981). "Modeling Circulation in Depth-Averaged Flow," *J. of the Hydraulics Div.* ASCE, Vol. 107, No. HY11.

표 1. Manning 계수 산정식의 계수(EMRL, 2002)

Condition	r_1	r_2	r_3	r_4
Mississippi River	0.02	0.080	0.026	2.0
S-shape	0.04	0.167	0.040	4.0
San Francisco Bay	0.04	0.167	0.040	4.0

표 2. 평면 이차원 흐름모의 조건

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

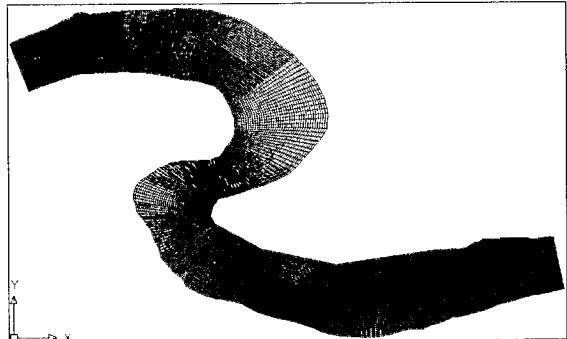


그림 1. 수치모의 격자

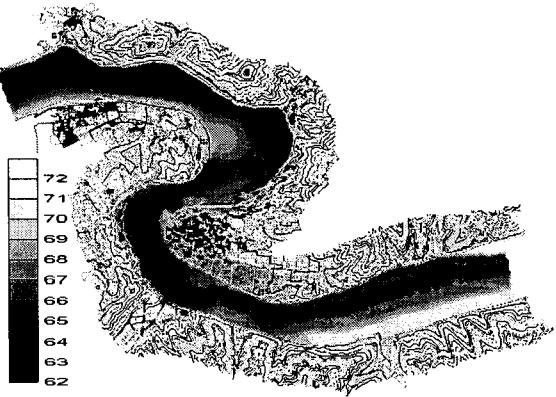
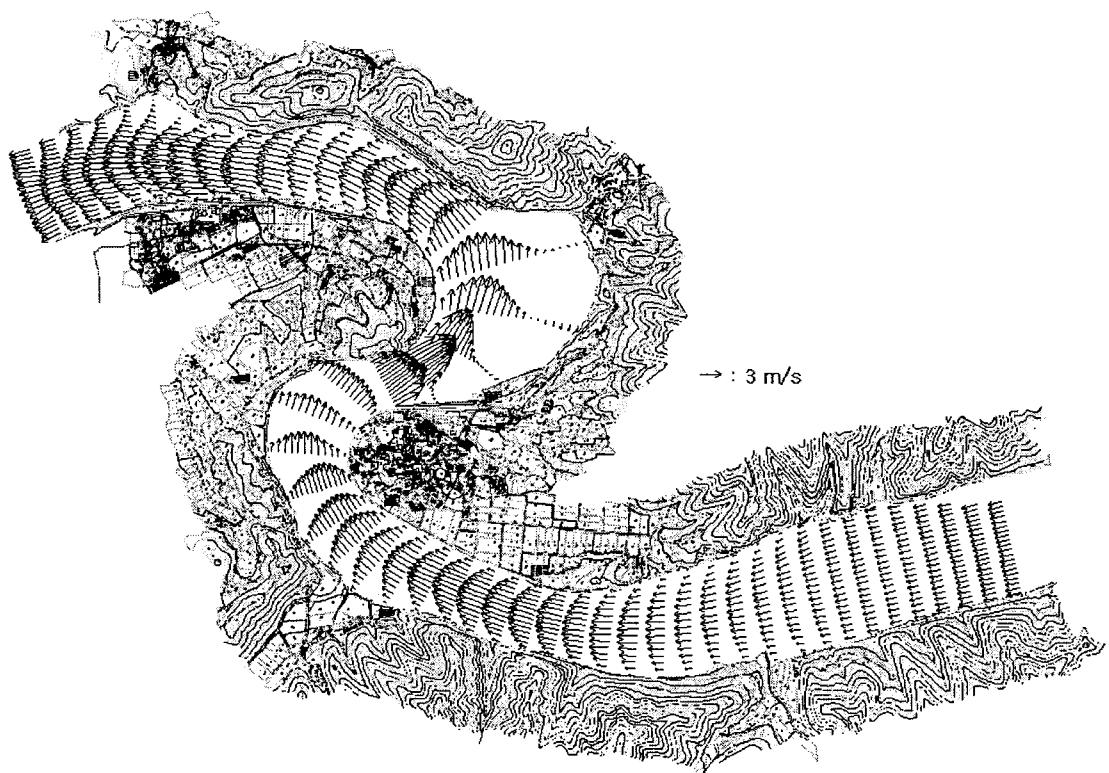
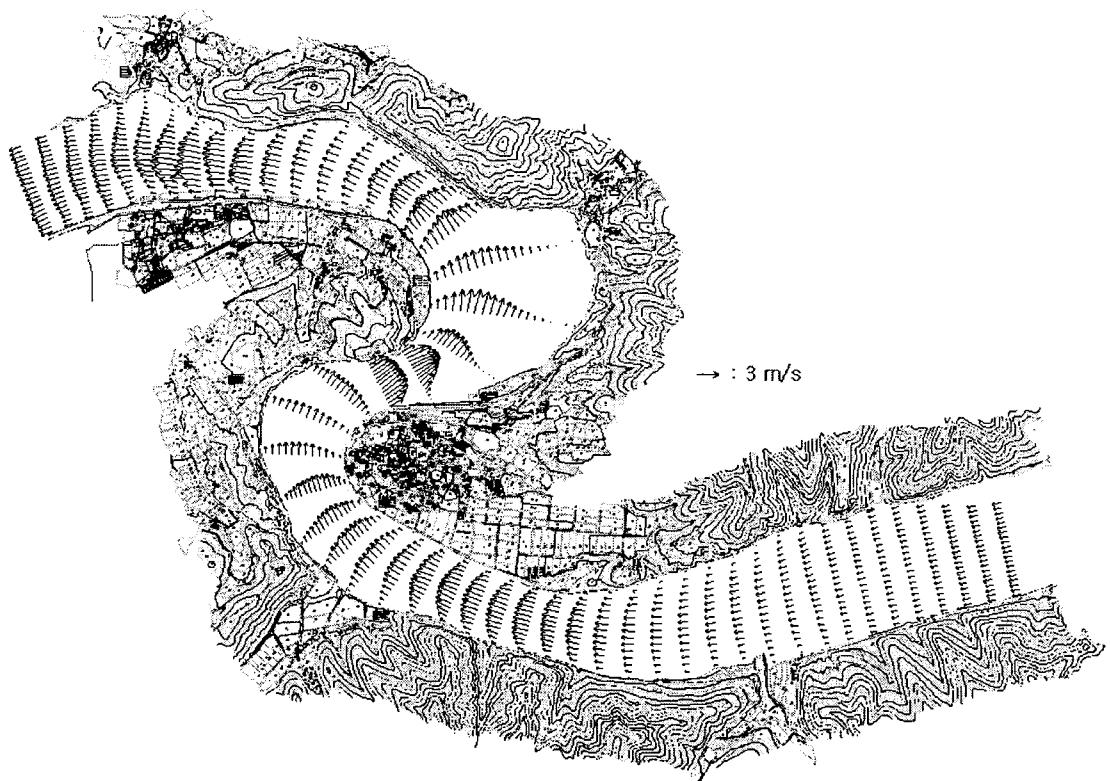


그림 2 수치모형의 지형 입력자료 (단위: EL. m)



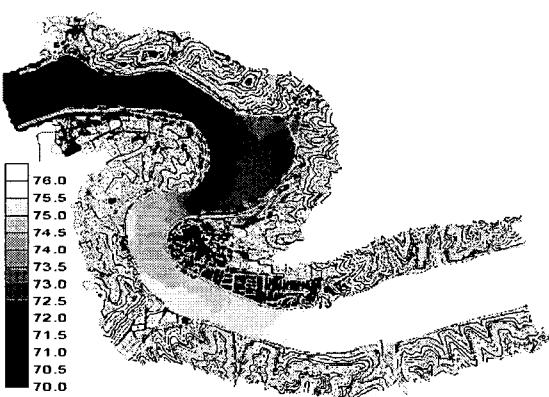
(a) F-I

그림 3. 모의조건별 정상류 흐름 계산 결과(유속)



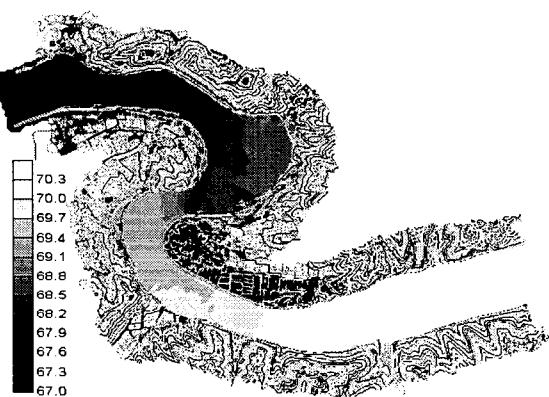
(b) F-II

그림 3. (계속)



(a) F-I

그림 4. 모의조건별 수위 계산 결과(EL. m)



(b) F-II

그림 4. (계속)