

KU-RLMS 모형을 이용한 반변천 합류부 흐름 예측에 관한 연구

A Study on the Prediction of Flow near the Confluence of Banbyeoncheon by Using the KU-RLMS Model

이금찬^{*}, 이남주^{**}, 류시완^{***}, 여홍구^{****}

Keum Chan Lee, Nam Joo Lee, Siwan Lyu, Hong Koo Yeo

요 지

하천 수치모델링을 통한 흐름, 오염물질 거동, 지형변화 해석 등을 효율적인 하천 수질 관리를 위해서 상당히 중요한 부분은 차지한다. 수질이나 지형변화를 보다 정확하게 예측하기 위해서는 하천 흐름 예측의 정확도 향상이 중요한 역할을 하게 된다. 본 연구는 평면 이차원 하상변동 및 수질예측 수치모형인 KU-RLMS 모형을 이용하여 낙동강 상류의 반변천 합류부의 흐름 특성을 규명하고, 수질 모형을 수행하기 위한 흐름 계산 결과를 제공하기 위해 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 지베방정식은 3차원 Reynolds 방정식으로부터 수심적분된 2차원 연속방정식과 운동량방정식을 불규칙한 경계를 현실적으로 모사할 수 있는 직교곡선 좌표계로 변환한 방정식을 사용한다.

수치모형 적용을 위한 현황분석으로 안동 및 임하 조정지댐의 방류량, 안동 수위관측소의 자료를 분석하였다. 흐름 모형을 보정하기 위해 안동대교 지점에서 횡유속 분포를 측정하였으며, 이 결과를 사용하여 흐름 모형의 매개변수인 Manning 계수와 공간가중계수를 추정 및 검증하였다. 안동다목적댐과 임하다목적댐의 방류량을 고려하여 수치모의조건을 결정하였으며, 각 조건에 대한 흐름 변화 특성을 분석하였다.

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

1. 서 론

임하호는 임하댐 준공 후 2001년까지는 집중강우 및 태풍의 영향이 비교적 적었지만, 2002년 태풍 ‘루사’와 2003년 태풍 ‘매미’에 의한 집중강우로 인하여 임하호 탁도는 최고 1,221.0 NTU를 기록하였으며, 340여 일간 하류지역으로 고탁수가 방류되었다. 자연 상태에서 홍수기에 발생하는 탁수가 강우 후 약 2~3일이 지나면 사라지는 것에 비해 연중 고탁수 현상이 지속되었고, 2005년 2006년이 되면서 30 NTU 이상 지속되는 일수는 점차 감소하고 있는 실정이다. 낙동강의 안동시내 구간은 본류와 반변천이 만나는 합류역이며, 안동조정지댐과 임하조정지댐의 방류량에 의해 흐름이 조절되는 지역이다. 이 구간은 임하댐의 고탁도 방류수의 영향을 직접 받는 영역으로 탁도의 이차원적 혼합특성이 잘 나타나는 영역이다. 허성남 등(2006)은 이 지역에서 수질항목의 이차원적 혼합특성을 규명하기 위한 현장조사를 수행한 바 있으며, 김영도 등(2007)은 RMA2와 RMA4 모형을 사용하여 안동시내 구간에 대한 탁도 모델링 연구를 수행한 바 있다.

하천 수치모델링을 통한 흐름, 오염물질 거동, 지형변화 해석 등을 효율적인 하천 수질 관리를 위해서 상당히 중요한 부분은 차지한다. 수질이나 지형변화를 보다 정확하게 예측하기 위해서는 하천 흐름 예측의 정확도 향상이 중요한 역할을 하게 된다. 본 연구는 평면 이차원 하상변동 및 수질예측 수치모형인 KU-RLMS

* 정회원·경성대학교 토목공학과 석사과정 E-mail: kc0410@mail.ks.ac.kr

** 정회원·경성대학교 건설환경공학부 부교수 E-mail: njlee@ks.ac.kr

*** 정회원·성원대학교 토목공학과 조교수 E-mail : minilite@changwon.ac.kr

**** 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 E-mail: yeo917@kict.re.kr

모형을 이용하여 낙동강 상류의 반변천 합류부의 흐름 특성을 규명하고, 수질 모형을 수행하기 위한 흐름 계산 결과를 제공하기 위해 수행하였다.

2. KU-RLMS 모형

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

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

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

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

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.

부유사의 수송은 부유사의 종류별로 이송확산방정식을 적용하여 구하며, 지배방정식은 3차원 이송확산방정식을 수심적분하여 얻을 수 있다(이남주, 1996).

$$\frac{\partial(h C_i)}{\partial t} + \frac{\partial(h UC_i)}{\partial x} + \frac{\partial(h VC_i)}{\partial y} = \frac{\partial(h \bar{J}_{i1})}{\partial x} + \frac{\partial(h \bar{J}_{i2})}{\partial y} + P_i - D_i + S_i \quad (4)$$

여기서, i 는 유사의 종류를 나타내는 하첨자, C_i 는 i 번째 유사의 수심적분 농도, P_i 와 D_i 는 각각 침식에 의한 소멸항과 퇴적에 의한 생성항, S_i 는 부유사 발생량이다. 바닥 표고의 변화는 유사에 대한 질량보존방정식으로부터 구할 수 있다. 흐름특성 변화에 따른 하상고 변화는 하상표면의 검사면적에 질량보존법칙을 적용하여 다음과 같이 구할 수 있다(이남주, 1996).

$$\gamma_b(1-p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{bl}}{\partial x} + \frac{\partial q_{l2}}{\partial y} = -g(P_i - D_i + S_i) \quad (5)$$

여기서, q_{bl} 과 q_{l2} 는 각각 x, y 방향의 단위폭에 대한 단위중량당 소류사 수송률로서 소류사량공식을 이용하여 계산하며, γ_b 는 하상토의 단위중량, p 는 공극률이다. 유사량공식은 수송모형과 바닥변형모형을 연결하는 역할을 한다. 점착성 및 비점착성 부유사량공식에 의해 계산된 침식·퇴적량은 이송확산방정식과 바닥변형모형의 입력자료로 사용되며, 소류사량공식은 바닥변형모형의 입력자료로 사용된다. 이 모형에서 사용하는 유사량 공식은 Hayter and Metha(1982)의 침식공식, Partheniades(1962)의 침식공식, Odd and Owen(1972) 퇴적공식, van Rijn(1984a,b)의 부유사량 공식과 소류사량 공식을 사용한다.

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

$$\xi_{xx} + \xi_{yy} = P(\xi, \eta), \quad \eta_{xx} + \eta_{yy} = Q(\xi, \eta) \quad (6)$$

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

수치격자는 그림 1과 같이 25×170 개의 엇갈린 격자로 구성하였다. 그림의 계산격자망에서 공간격자 간 격은 $\Delta\xi = \Delta\eta = 20$ 인 격자를 사용하였다. 그림 2는 수치모형에서 사용한 지형자료를 도시한 것이다. 정상류 흐름을 계산하기 위한 시간격자간격 Δt 는 0.1 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 산정식 (6)을 사용하였다.

$$n = r_1/H^{r_2} + r_3 \exp(-H/r_4) \quad (6)$$

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

평면 이차원 수치모형의 흐름모의 조건은 두 조정지댐 방류량 차이에 따른 흐름장 변화를 보기 위해 표 2와 같이 결정하였다. 그림 3은 표 2의 모의조건별 정상류 흐름계산 결과로서 유속장을 도시한 것이며, 그림 4는 수위 계산결과를 도시한 것이다. 모의조건 F-I의 경우 반변천의 유량이 안동조정지댐 방류량에 비해 5배 크기 때문에 조정지댐 방향으로 흐름이 밀고 들어가는 현상을 발견할 수 있으며 반변천보다 수위가 약 30 cm 이상 상승함을 알 수 있다. 모의조건 F-II의 경우는 유량이 같은 조건으로 합류부에서 흐름의 교란이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 모의조건 F-I과 반대의 경우인 모의조건 F-III은 반변천의 유량이 안동조정지댐 방류량의 25%에 불과하기 때문에 반변천 방향으로 흐름이 밀고 들어가는 현상을 발견할 수 있으며 반변천 쪽의 수위가 약 30 cm 이상 상승함을 알 수 있다.

4. 결 론

하천 수치모델링을 통해 수질이나 지형변화를 보다 정확하게 예측하기 위해서는 하천 흐름 예측의 정확도 향상이 중요한 역할을하게 된다. 본 연구는 평면 이차원 하상변동 및 수질예측 수치모형인 KU-RLMS 모형을 이용하여 낙동강 상류의 반변천 합류부의 흐름 특성을 규명하고, 수질 모형을 수행하기 위한 흐름 계산 결과를 제공하기 위해 수행하였다.

이 연구에서는 평면 이차원 수치모형을 사용하여 안동 및 임하 조정지댐 방류량 차이에 따른 흐름장 변화를 분석하였다. 모의조건 F-I의 경우 반변천의 유량이 안동조정지댐 방류량에 비해 5배 크기 때문에 조정지댐 방향으로 흐름이 밀고 들어가는 현상을 발견할 수 있으며 반변천보다 수위가 약 30 cm 이상 상승함을 알 수 있다. 모의조건 F-II의 경우는 유량이 같은 조건으로 합류부에서 흐름의 교란이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 모의조건 F-I과 반대의 경우인 모의조건 F-III은 반변천의 유량이 안동조정지댐 방류량의 25%에 불과하기 때문에 반변천 방향으로 흐름이 밀고 들어가는 현상을 발견할 수 있으며 반변천 쪽의 수위가 약 30 cm 이상 상승함을 알 수 있다.

감 사 의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심 B01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김영도, 이남주, 허성남, 임태효, 정제호, 신찬기 (2007. 4). “임하댐 방류탁수의 2차원 혼합거동 연구”, 2007년도 공동 춘계학술발표회 논문집. 대한상하수도학회·한국물환경학회, (CD-ROM), 1078-1082.
2. 이남주 (1996). 좌표변환에 의한 이차원 유사이동모형의 개발 및 적용. 공학박사 학위논문, 서울대학교 토목공학과.
3. 허성남, 임태효, 정제호, 박세환, 이동화, 박배경, 신찬기, 이남주, 김영도 (2005). 낙동강 본류 탁도 예측 기법에 관한 연구. NIER No. 2006-49-831, 국립환경과학원 낙동강물환경연구소.
4. EMRL (2002) SMS Surface Water Modeling System Tutorial, Version 8.0. Brigham Young University, pp. 2-1~2-20.

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	안동조정지댐 방류량	임하조정지댐 방류량	하류경계 유량	하류경계 수위
F-I	5 m³/s	145 m³/s	150 m³/s (안동수위표 지점)	EL. 83.44 m (안동수위표 지점)
F-II	75 m³/s	75 m³/s		
F-III	145 m³/s	5 m³/s		

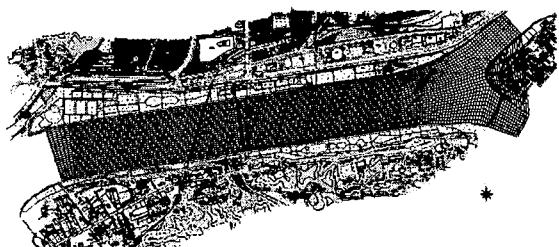


그림 1. 수치모의 격자

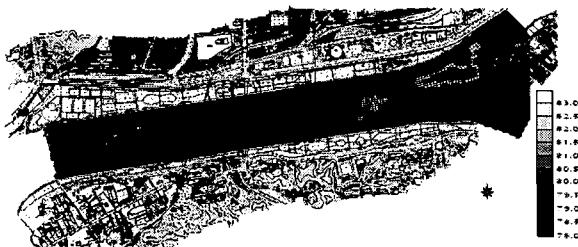
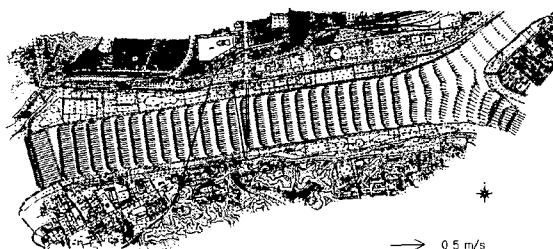
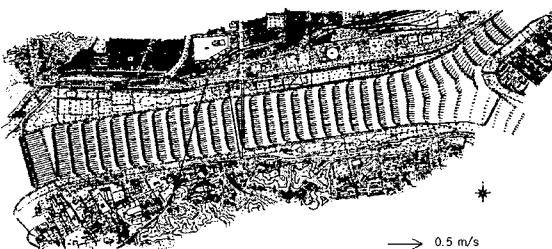


그림 2. 지형 입력자료 (단위: EL. m)



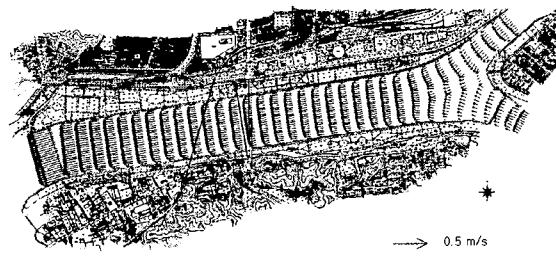
(a) F-I

그림 3 모의조건별 정상류 흐름 계산 결과(유속)

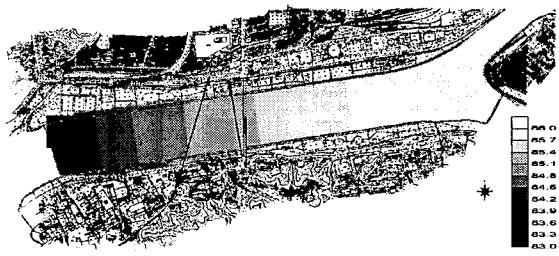


(b) F-II

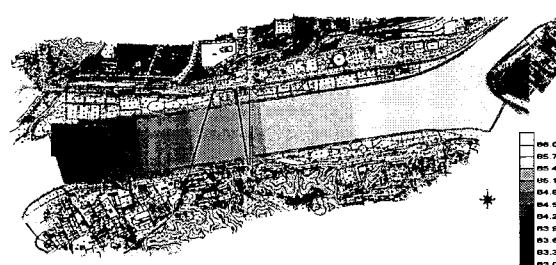
그림 3. (계속)



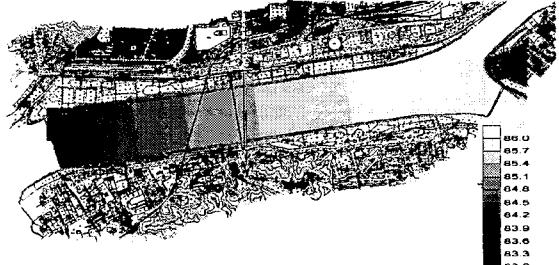
(c) F-III
그림 3. (계속)



(a) F-I
그림 4. 모의조건별 수위 계산 결과(EL. m)



(b) F-II
그림 4. (계속)



(c) F-III
그림 4. (계속)