

KU-RLMS 모형을 이용한 반변천 합류부 탁도 예측에 관한 연구

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

임지현*, 이남주**, 류시완***, 여흥구****

Ji Hyun Lim, Nam Joo Lee, Siwan Lyu, Hong Koo Yeo

요 지

댐 하류로 탁수를 선택적으로 배제하기 위해서는 방류 탁수가 하류에 미치는 영향을 정확히 예측할 수 있는 하천 탁도 예측 및 관리시스템 구축이 필요하다. 낙동강과 반변천의 합류부에서의 이차원적인 혼합에 관한 수치해석 결과는 완전혼합을 가정하는 일차원 수질모델링의 초기 입력자료에 사용됨으로써 낙동강 본류 전체구간의 탁도 모의결과의 정확성을 높이는 데 사용될 수 있다. 본 연구는 낙동강의 중상류에 위치한 반변천 합류부에 평면 이차원 비정상 수치모형인 KU-RLMS 모형을 적용하여 탁도 변화 특성을 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, 수심적분된 2차원 연속방정식, 운동량방정식, 이송확산방정식을 불규칙한 경계를 현실적으로 모사할 수 있는 직교곡선 좌표계로 변환한 방정식을 사용한다. 이 모형은 흐름, 농도, 지형변화를 조합하여 계산할 수 있는 모형으로서 점작성 및 비점작성 유사의 이동을 모의할 수 있다.

수치모형 적용을 위한 현황분석으로 안동 및 임하 조정지댐의 방류량, 안동 수위관측소의 수위, 범홍교 및 포진교 지점의 탁도 자료를 분석하였다. 이송확산모형의 보정을 위해, 안동대교 지점의 탁도 횡분포 측정 자료를 사용하여 확산계수에 대한 매개변수 추정 및 검증을 수행하였다. 또한, 안동조정지댐과 임하조정지댐의 방류량 및 방류탁도를 고려하여 수치모의조건을 결정하였으며, 각 조건에 대한 탁도 변화 특성을 분석하였다.

핵심용어: 낙동강, KU-RLMS, 탁도, 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, 2005년이 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. 임하댐 탁수저감 대책(한국수자원공사, 2004)에서는 장기간의 기간이 소요되는 유역대책과 더불어 단기적인 저수지내 대책으로서 탁수 장기화에 따른 피해를 저감하고자 고탁수 우선배제를 실시하고 있다. 이를 위하여 임하댐 표면취수설비를 개선하였고,

* 정회원.경성대학교 토목공학과 석사과정 E-mail: lj0301@mail.ks.ac.kr
** 정회원.경성대학교 건설환경공학부 부교수 E-mail: njlee@ks.ac.kr
*** 정회원.창원대학교 토목공학과 조교수 E-mail: minilite@changwon.ac.kr
**** 정회원.한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 E-mail: yeo917@kict.re.kr

집중호우시 저수지내에 발생된 고탁수층을 가급적 빠른 시기에 하류하천인 낙동강 본류로 방류함으로써 하류하천의 탁수 발생일수를 최소화하기 위한 저수지 취수설비 운영을 실시하고 있다. 이남주 등(2005)은 임하호에서 장기간 고탁도를 유지시키는 물질은 미세 부유 토립자이며, 침강속도가 0.1 m/day 이하로 흐름이 존재할 경우 침강속도를 무시할 수 있을 것으로 분석하였다. 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.

댐 하류로 탁수를 선택적으로 배제하기 위해서는 방류 탁수가 하류에 미치는 영향을 정확히 예측할 수 있는 하천 탁도 예측 및 관리시스템 구축이 필요하다. 낙동강과 반변천의 합류부에서의 이차원적인 혼합에 관한 수치해석 결과는 완전혼합을 가정하는 일차원 수질모델링의 초기 입력자료에 사용됨으로써 낙동강 본류 전체구간의 탁도 모의결과의 정확성을 높이는 데 사용될 수 있다. 본 연구는 낙동강의 중상류에 위치한 반변천 합류부에 평면 이차원 비정상 수치모형인 KU-RLMS 모형을 적용하여 탁도 변화 특성을 규명할 목적으로 수행하였다.

2. KU-RLMS 탁도 예측 모형

KU-RLMS 모형은 1996년에 의해 개발된 평면 이차원 하상변동 예측모형으로서, 직교좌표계로 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 수직적분하면 흐름모형의 지배방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다(이남주, 1996).

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

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

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

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, V 는 x, y 방향의 수심평균 유속성분, τ_{b1} 과 τ_{b2} 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.

탁도를 유발하는 미세한 유사 입자의 수송은 이송확산방정식을 사용하여 계산하며, 지배방정식은 3차원 이송확산방정식을 수직적분하여 얻을 수 있다(이남주, 1996).

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(hUC)}{\partial x} + \frac{\partial(hVC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD \frac{\partial C}{\partial y} \right) + P \quad (4)$$

여기서, C 는 수직적분 농도, D 는 확산계수, P 는 외부로부터의 탁질입자 유입량이다.

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.

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

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 알고리즘을 이용하여 해를 구한다.

3. KU-RLMS 모형의 적용

본 연구에서는 수심적분 이차원 흐름 및 이송확산 예측 모형인 KU-RLMS 모형을 낙동강 상류에 위치한 반변천 합류점 인근 하도에 적용하여 비홍수기 탁수의 평면적 거동을 분석하고자 하였다. 흐름 및 탁도 계산을 위한 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 것으로, 건설부(1993)의 단면 자료를 사용하여 구하였다. 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.

수치모형의 적용영역은 낙동강 본류의 상류경계는 반변천 합류점에서 약 0.37 km 상류(안동댐의 역조정지댐 직하류)에 위치하며, 반변천쪽의 상류경계는 합류점에서 약 0.36 km 상류에 위치한다. 하류경계는 합류점에서 약 3.13 km 하류에 위치한다. 본 연구에서 사용한 지형자료는 현재의 지형과는 상당한 차이가 있지만, 1993년 이후에 새로 측량된 자료가 없는 실정이어서 과거의 지형자료를 그대로 사용하였다. 표 1은 2차원 수치모의의 매개변수인 확산계수를 보정하기 위해 현장에서 측정한 탁도 분포를 나타낸 것으로서, 확산계수 보정에는 7월 12일자 측정결과를 사용하였다. 그림 3은 수온 예측을 위해 이송확산방정식 계산에 사용되는 7월 12일의 유속장을 도시한 것이다. 본 연구에서는 이송확산모형의 확산계수를 변화시켜 가면서 확산계수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 확산계수는 0.1, 0.2, 0.01, 0.001 m^2/s 에 대하여 정상상태의 탁도를 예측하였으며, KU-RLMS 모형의 적용결과는 그림 4와 같다. 그림에서 확산계수는 완전히 혼합되는 거리에 큰 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다. 수치모의 결과와 현장 실측 결과를 비교하면, 탁도를 유발하는 물질에 대한 확산계수는 대략 0.001 ~ 0.02 m^2/s 의 범위에 있다고 판단되며, 본 연구에서 확산계수는 0.01 m^2/s 로 결정하였다.

표 1. 매개변수 검토정을 위한 현장실측 결과(허성남 등, 2006)

측정장소	4/14	6/26	6/27	6/28	7/5	7/12	7/13	7/14
안동조정지 방류량(CMS)	26.2	53.9	53.6	52.3	47.7	48.3	54.8	52.3
임하조정지 방류량(CMS)	2.5	16.3	15.2	15.1	10.6	108.3	107.1	106.1
합류부 유량(CMS)	28.7	70.2	68.8	67.4	58.3	156.6	161.9	158.4
하류 수위(EI. m)	78.94	79.49	79.49	79.49	79.49	79.5	79.5	79.5
법흥교 탁도(NTU)	5	1.4	1.9	1.2	4.1	11.4	38.1	13.2
포진교 탁도(NTU)	7	3.2	3.8	2.2	2.9	231	236	189
안동대교 1 탁도(NTU)	9.9	1.1	2.1	1.5	6.6	235	184	185
안동대교 2 탁도(NTU)	9.7	2.2	3.7	1.8	4.6	235	180	179
안동대교 3 탁도(NTU)	8.6	2.3	1.6	2.6	2.5	245	180	221
안동대교 4 탁도(NTU)	5	1.9	2.6	2.3	4.7	196	181	150
안동대교 5 탁도(NTU)	4.3	1.3	2.1	1.2	1.4	52.8	181	73.5
안동대교 6 탁도(NTU)	3.9	1.1	1.4	1.8	0.7	22.4	169	29

4. 결론

탁수를 선택적으로 배제하기 위해서는 방류수가 하류에 미치는 영향을 정확히 예측할 수 있는 하천 탁도 예측시스템 구축이 필요하며, 지천 합류부에서의 이차원적인 혼합에 관한 수치해석 결과는 완전혼합을 가정하는 일차원 수질모델링의 초기 입력자료에 사용됨으로써 낙동강 본류 전체구간의 탁도 모의결과의 정확성을 높이는 데 사용될 수 있다. 본 연구는 낙동강의 중상류에 위치한 반변천 합류부에 평면 이차원 비정상 수치모형인 KU-RLMS 모형을 적용하여 탁도 변화 특성을 규명할 목적으로 수행하였다.

본 연구에서는 평면이차원 탁도 수치 모델링의 확산계수를 보정하기 위하여, 현장 측정 자료를 수치모의 결과와 비교하였다. KU-RLMS의 이송확산모형에 사용되는 확산계수를 변화시켜 가면서 확산계수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. RMA4 모형의 확산계수는 0.001, 0.01, 0.1, 0.2 m²/s에 대하여 정상상태의 탁도를 예측하였으며, 확산계수별 안동대교에서의 수치모의 결과와 현장 실측 결과를 비교하였다. 낙동강 본류에 반변천이 유입되어 횡적 혼합이 주를 이루는 합류부에서의 탁도를 유발하는 물질에 대한 확산계수는 0.01 m²/s로 결정하였다.

감 사 의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(O6건설핵심 B01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 건설부 (1993). 낙동강 하천정비기본계획(보완III) (남강합류부-반변천합류부).
2. 김영도, 이남주, 허성남, 임태효, 정제호, 신찬기 (2007. 4). “임하댐 방류탁수의 2차원 혼합거동 연구”, 2007년도 공동 춘계학술발표회 논문집. 대한상하수도학회·한국물환경학회, (CD-ROM), 1078-1082.
3. 이남주 (1996). 좌표변환에 의한 이차원 유사이동모형의 개발 및 적용. 공학박사 학위논문, 서울대학교 토목공학과.
4. 이남주 등 (2005) 탁질입자 침강속도
5. 한국수자원공사 (2004). 임하댐 탁수저감 방안 수립 보고서.
6. 허성남, 임태효, 정제호, 박세환, 이동화, 박배경, 신찬기, 이남주, 김영도 (2006). 낙동강 본류 탁도 예측 기법에 관한 연구. NIER No. 2006-49-831, 국립환경과학원 낙동강물환경연구소.



그림 1. 수치모의 격자

그림 2. 지형 입력자료 (단위: EL. m)

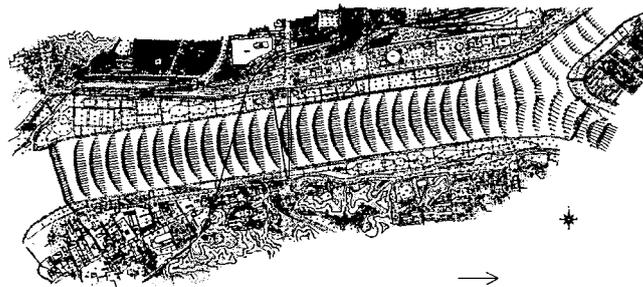
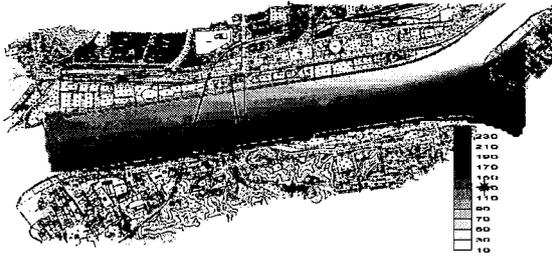
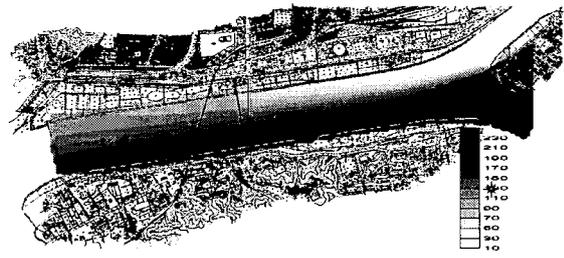


그림 3. 정상류 흐름 계산 결과



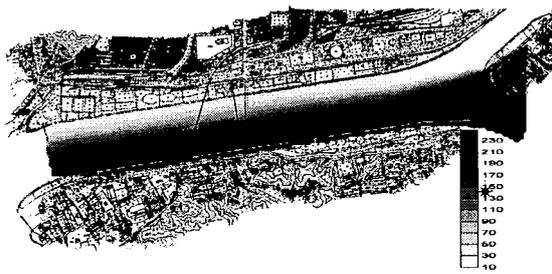
(a) $D = 0.1 \text{ m}^2/\text{s}$

그림 4. 탁도 모의 결과 (단위: NTU)



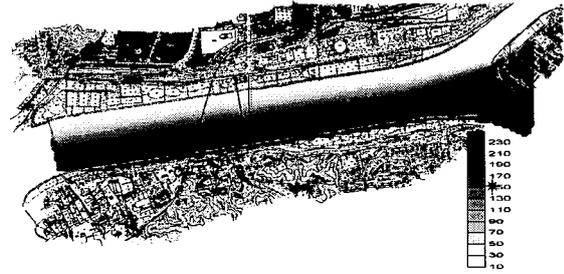
(b) $D = 0.02 \text{ m}^2/\text{s}$

그림 4. (계속)



(c) $D = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$

그림 4. (계속)



(d) $D = 0.001 \text{ m}^2/\text{s}$

그림 43. (계속)