

1차원 비정상상태 하천수질모의를 위한 KORIV1-WIN 개발

Development of One-Dimensional Unsteady Water Quality Model for River

정세웅*, 고익환**, 김남일***

Se Woong Chung, Ick Hwan Ko, Nam Il Kim

Abstract

During drought season, the self-purification capacities of the four major rivers in Korea are significantly controlled by environmental maintenance flows supplied from the mid- or upstream large dams. Therefore, it is obviously important to operate the dams considering not only water quantity aspects but also conservation of downstream water quality and aquatic ecosystems. Mathematical water quality models can be efficiently used to serve as a decision support tool for evaluating the effects of operational alternatives of upstream dams on the downstream aquatic environment. In this study, an unsteady one-dimensional water quality model, KORIV1-WIN was developed based on the theoretical and numerical algorithms for hydrodynamics and water quality simulations of CE-QUAL-RIV1. It consists of hydrodynamic(KORIV1H) and water quality(KORIV1Q) modules, and pre- and post-processors for input data preparations and output displays. The model can be used to predict one-dimensional hydraulic and water quality variations in rivers with highly unsteady flows such as dam outflow change, rainfall-runoff, and chemical spill events.

Key words: Unsteady water quality model, dam operation, KORIV1-WIN, CE-QUAL-RIV1

1. 서 론

우리나라의 주요 4대강 하천은 하상계수가 높아 갈수기에는 유역으로부터 공급되는 자연유량이 감소하여 오염물질의 자정능력이 급격히 저하되는 특성을 지니고 있다. 이로 인해 해마다 갈수기가 되면 주기적으로 하천의 수질이 악화되는 현상이 반복되고 있어 그 동안 추진해 온 환경기초시설 확충을 통한 수질관리대책에는 한계가 있음이 입증되었다. 조만간 오염총량관리제도가 시행되어 수용 수체의 환경용량을 고려한 수질관리가 이루어질 전망이지만, 여전히 기준유량이 10년 평균 저수량으로 설정되어 있어 본격적인 갈수기와 가뭄시에는 하천의 목표수질 확보가 어려운 것이 현실이다. 따라서 댐에 의해 조절되는 하천에서는 적절한 하천유지유량의 확보는 물론이고, 하류 하천의 수량과 수질의 시변적 상관성을 고려한 과학적 수질관리 기술의 도입이 절실히 요구된다. 특히, 최근에 화두가 되고 있는 유역의 수량과 수질의 통합관리를 실현하기 위해서도 하천의 수량뿐만 아니라 수질과 어류의 서식환경까지도 고려한 선진국형 댐 운영기술의 개발이 필요하다.

본 연구의 목적은 하류 하천의 수질과 생태환경을 고려한 댐 용수공급 의사결정을 지원하기 위해 강우-유출과 댐 방류량 증가와 같은 부정류 흐름상태에서 하천의 동적인 수질변화를 해석할 수 있는 비정상상태(unsteady state) 수질 예측 모형을 개발하는데 있다.

* 정희원 · 충북대학교 환경공학과 조교수 · E-mail : chung@chungbuk.ac.kr

** 정희원 · 한국수자원공사 수자원연구시스템연구소 소장 · E-mail : ihko@kowaco.or.kr

*** (주)웹솔루스 대표이사 · utopia@websolus.co.kr

2. KORIV1-WIN 모형의 개발

KORIV1-WIN은 미국 공병단의 Waterways Experiment Stations(WES)에서 개발한 CE-QUAL-RIV1의 수리동력학 및 수질해석 알고리즘을 기본모델로 채택하여, 최근에 객체지향적인 프로그램 제작에 많이 활용되고 있는 .NET Visual Basic 언어를 이용하여 사용자가 손쉽게 입력자료를 구성하고 출력결과를 그래프와 테이블 형태로 조회할 수 있도록 사용자 인터페이스를 추가하여 개발하였다. 이 모형은 하천의 흐름특성을 수심방향과 횡방향으로 평균하여 해석하는 1차원 단면평균 수리 및 수질 해석모델로써 수리모듈 (KORIV1H), 수질모듈 (KORIV1Q), 입력자료 구성 Pre-Processor, 그리고 출력결과 조회 Post-Processor로 구성되어 있다.

부정류 해석을 위한 수리모듈의 지배방정식은 St. Venant의 연속방정식(식.1)과 운동량방정식(식.2)으로 구성된다. 수리해석모듈에서는 유량, 유속, 하천단면, 수위와 같은 하천의 수리학적 특성값을 계산하고 그 결과를 저장하여 수질해석모듈의 입력자료로 전달한다. 수리모듈은 지하수와 같이 하천경계를따라 연속적으로 유입하는 측면류 흐름을 고려할 수 있으며, 여러개의 지류하천을 가진 하천시스템의 모의가 가능하다. 또한, 이 모델은 경계조건의 정의에 따라서는 정상상태에서의 모의도 가능하다. 수리지배방정식의 수치해석은 연속 및 운동량 방정식을 4점 음해적(implicit) 유한차분법으로 해석한다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(UA)}{\partial x} = q \quad \text{혹은} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(QU)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA \left(S_0 - S_f - \frac{\Delta h_c}{\Delta x} \right) \quad (2)$$

여기서 A는 하천단면적, t는 시간, U는 단면평균 유속, q는 단위길이 당 횡 방향 유입량, g는 중력가속도, S₀는 하천바닥경사, S_f는 에너지경사, h는 수위이다.

물질의 이송과 확산 그리고, 수질반응은 식 (3)과 같은 지배방정식으로 표현된다. 수질해석모듈은 수온, CBOD, 유기질소(Org-N), 암모니아성 질소(NH₃-N), 질산성질소(NO₃-N), 용존산소(DO), 유기 인(Org-P), 용존 인(PO₄-P), 조류(Algae), 철(Fe), 망간(Mn) 및 대장균(Coliform bacteria)의 12가지 수질항목에 대한 모의가 가능하다. 특히, 이 모델에서는 조류와 부착식물(Macrophytes)에 의한 광합성과 호흡, 그리고 하천에서의 CBOD 내생부하에 대한 모의가 가능하다. 수리지배방정식의 수치해석은 오염물질의 이송항은 인접한 두 절점 사이의 공간적 농도변화를 3차 다항식으로 묘사하는 Holly와 Preissman의 4차 양해법을 적용하였으며, 확산항은 음해적 유한차분법으로 해석하여 Thomas algorithm으로 해를 구한다.

$$\frac{\partial(Aa)}{\partial t} + \frac{\partial(UAa)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(DA \frac{\partial a}{\partial x} \right) + q\gamma + S^* \quad (3)$$

여기서 a는 오염물질의 농도, S*는 오염원의 발생 및 소멸항, D는 확산계수, γ = 측면류 유입수의 농도이다.

3. KORIV1-WIN 모형의 입출력프로세스

모형 수행에 필요한 입력자료는 하천 모식도, 지형 및 단면자료, 조도계수 등 수리학적 매개변수, 수질반응 매개변수, 상·하류 및 지류 유량(또는 수위, 수위-유량곡선식) 및 수질 경계조건, 그리고 하천 구간별 초기 수리 및 수질 조건이다. 입력자료가 준비되면 우선 수리모형의 입력파일인 *hydro_filename.INP*를 작성하고, 만약 동적인 횡방향 유입량과 실측 단면자료(HEC-RAS 형식)가 있는 경우에는 *.LAQ 파일과 *.XSF 파일을 각각 생성한 후 수리모듈을 실행한다. 수리모듈 수행 결과로 생성된 *hydro_filename.HYD*가 수질모듈의 입력자료로 전달된다. 다음으로 수질모듈의 주 입력파일인 *quality_filename.INP*를 작성하고, 만약 동적 횡방향 유량과 기상자료가 필요한 경우 *.LAC와 *.MET 파일을 각각 생성한 후 수질모듈을 수행한다. 최종적으로 계산된 수리와 수질 해석 결과를 계산 노드별(거리별) 그리고 시간별로 그래프와 테이블을 이용해 조회한다.

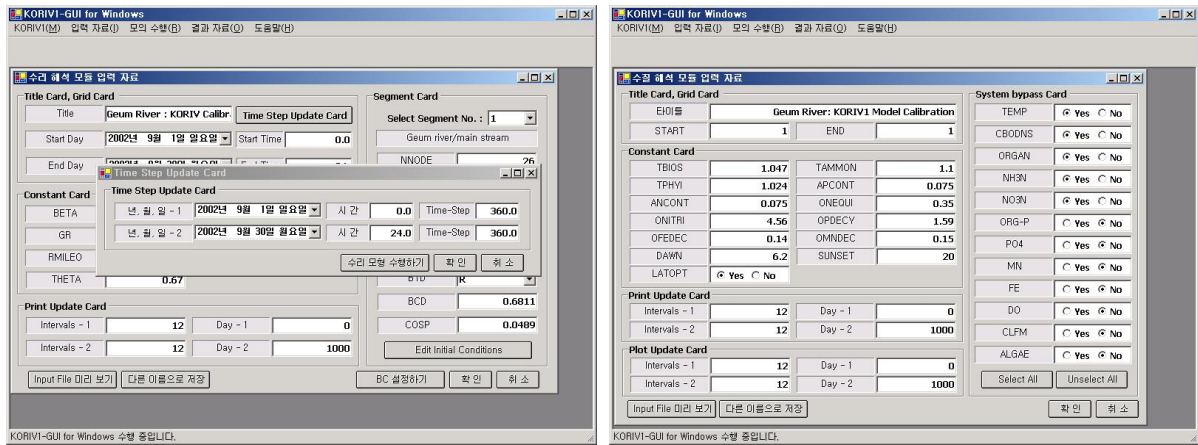


그림 1. KORIV-1-WIN 수리 및 수질 입력자료 구성 GUI

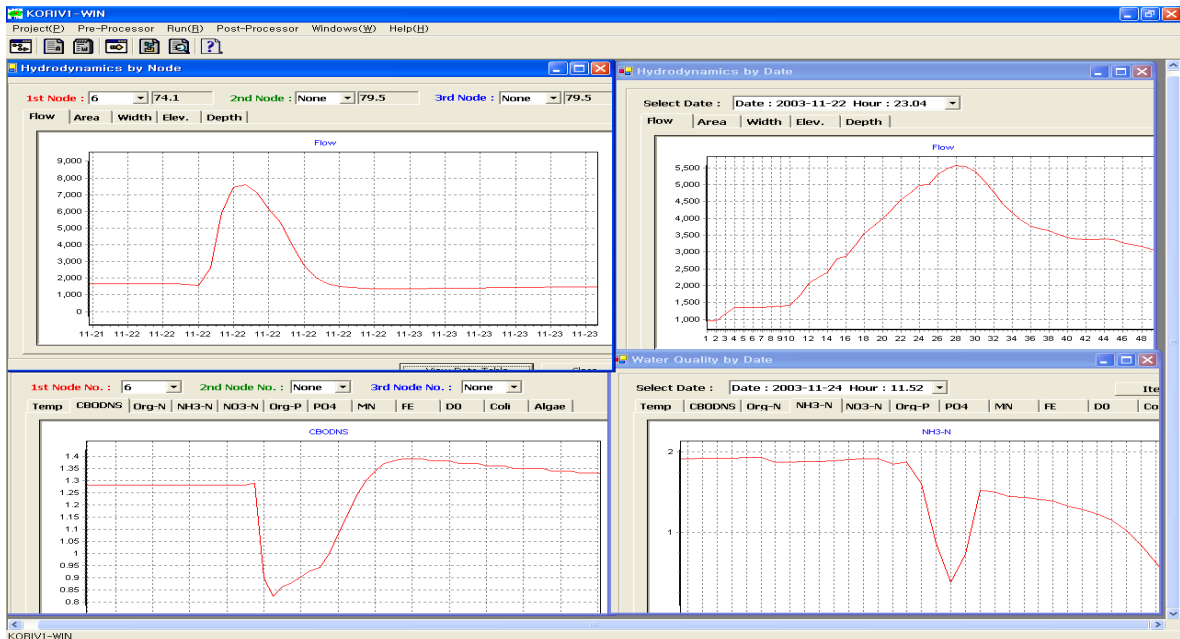


그림 2. KORIV-1-WIN 수리 및 수질 결과조회 GUI

4. 모형의 적용 : Case Study

4.1 적용대상 수계

모형 적용을 위한 대상구간은 댐 방류량에 따른 하천수질의 영향이 크며, 대전과 청주공단 등 오염물질의 누출사고의 잠재성이 있는 금강수계내 대청댐 하류(대청 조정지댐 ~ 금강 하구둑)를 선정하였다. 하천의 단면자료는 수리해석 해의 발산을 방지하고 안정성을 도모하기 위해 최근 금강하천정비기본계획에서 측량한 하천 단면자료를 사다리꼴 형태로 변환·정형화하여 입력자료를 재구성하였다. 전체 130.47km의 본류 하도를 상류, 중류, 하류의 3개 세그먼트로 구분하고 56개의 node로 나누어 모형을 구성하였으며, 갑천과 미호천을 포함한 금강본류로 유입하는 7개의 주요 지류하천을 세그먼트로 처리하여 다중지류 하천시스템으로 모의하였다.

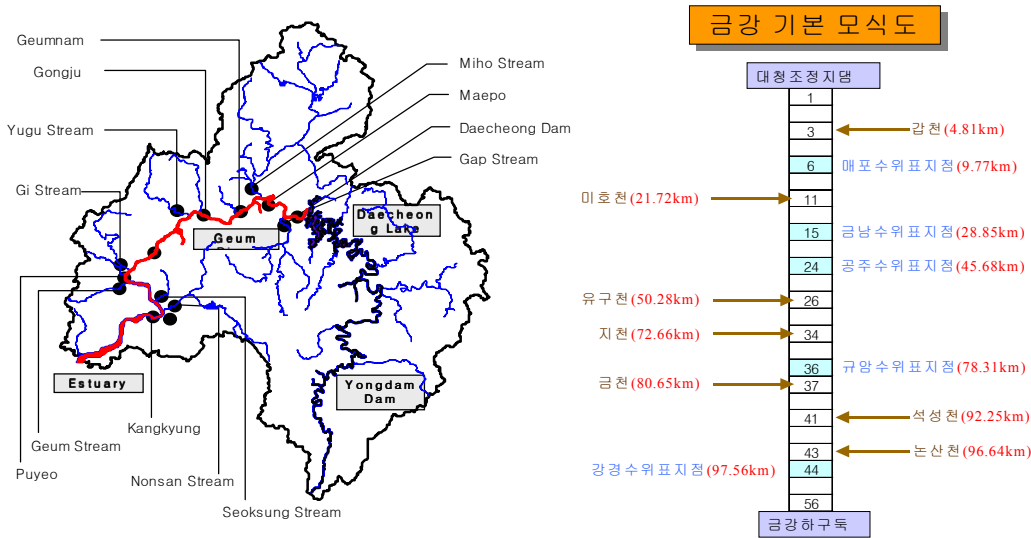


그림 3. 모의대상 수계 및 하천 모식도

4.2 적용결과

댐 방류량 변화에 따른 동적인 수질예측 모의를 위해 가상수질사고를 가정하였다. 즉, 갑천에 위치한 하수종말처리장의 고장으로 무처리 하수가 직접 금강 본류로 유입하는 상황을 가상하였으며, 댐 방류량 증가에 따른 주요지점의 시간과 거리에 따른 BOD 농도변화를 모의 해석하였다. 모의 기간은 2002년 9월1일부터 9월10일까지로 하였다. 하수처리장의 무처리 방류량은 9월3일 1시에서 9월4일 1시까지 24시간 동안 620,000 m³/sec이었으며 갑천 합류후 금강본류로 유입하는 유량가중 BOD 평균농도는 53.5 mg/L로 계산되었다.

모의결과 부여지점에서 BOD 농도를 3.0 mg/L이하로 낮추기 위해서는 댐으로부터 200 cms의 추가 방류가 필요하였다. 댐에서 추가방류를 하지 않을 경우, 9월4일 9시경에 부여지점에서의 BOD 최고농도는 5.7 mg/L를 나타내었다. 댐 방류량이 증가함에 따라 BOD의 침투농도는 급격히 감소하였으며, 도달시간은 약간 빨라지는 경향을 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 부정류 흐름특성을 고려한 1차원 비정상상태 하천 수위·수질 예측 모형 KORIV1-WIN을 선진국의 기술을 소화·흡수하여 개발하였다. 이 모형은 댐 용수 공급분야의 수질관리 핵심기술로 활용될 수 있으며, 그 동안 수량관리 위주의 물 공급 계획을 탈피하여 수량과 수질을 종합적으로 고려한 하천 운영을 실현하는 기반 기술을 제공한다. KORIV1-WIN 모형은 하천 수질 악화시 적정 댐 방류량 및 공급방법 결정, 수질사고 발생시 오염물질의 이동경로 추적과 상류 댐군의 방류시기 및 규모 결정, 댐 운영 기법 개선에 따른 하천수질개선 효과분석, 댐 등 신규 하천시설물 설치에 따른 하천수질 영향 검토, 생태 모의모형과 결합하여 어류서식환경 영향 검토, 오염물질 누출사고 대처 모의훈련, 호우시 도시 및 농촌으로부터 유입하는 비점오염 부하에 따른 수용하천의 동적 하천수질 예측, 오염부하량 할당을 위한 TMDL 평가도구 등 공공부문의 물관리산업분야에 유용하게 활용 될 수 있다.

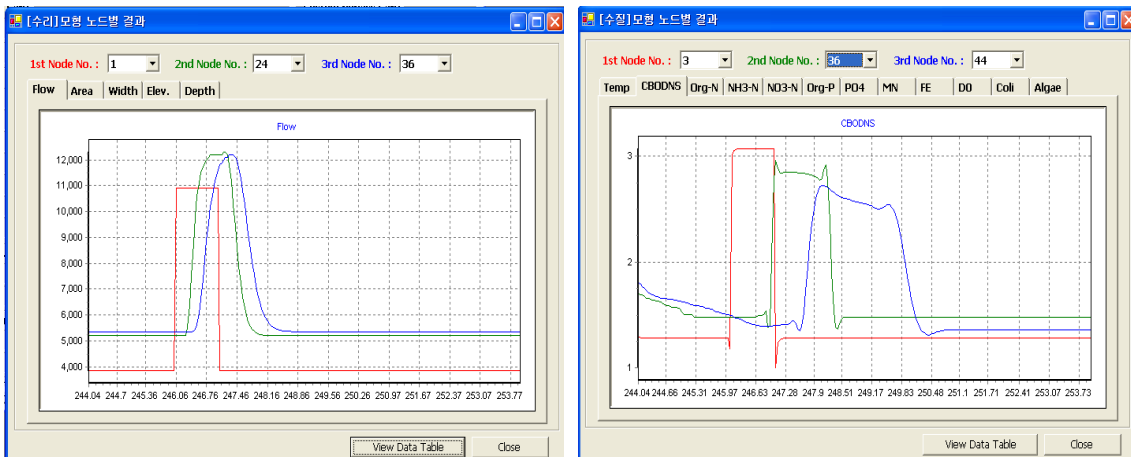


그림 4. 대형댐 방류량 변화에 따른 하천 수위 및 수질변화 모의 결과

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원 (과제번호: 1-6-1)에 의해 수행되었습니다. 이와 관련되신 분들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. USCOE, WES, Environmental Laboratory, "CE-QUAL-RIV1: A Dynamic, One-Dimensional (Longitudinal) Water Quality Model for Streams: User Manual," Instruction Report, 1995.
2. 정세웅, 이승환, 서동일, 고익환. "조절하천 수질관리를 위한 CE-QUAL-RIV1 모형의 평가", 2003년 대한환경공학회 추계학술발표논문집, p.73
3. 정세웅, 고익환. "실시간 물관리 운영 시스템 구축 기술 개발(IV) -수질예측모형개발 부문-", 2002년 대한토목학회 학술발표논문집, 301-304
4. 정세웅, 고익환. "수량·수질 통합 하천운영 지원을 위한 하천수질모형 구축", 2003년 한국수자원학회 학술발표회 논문집(I),pp.373-376