

수량·수질 통합 하천운영 지원을 위한 하천수질모형 구축

○정세웅¹⁾, 고익환²⁾

1. 서 론

환경부가 추진 중인 오염총량관리제도에서는 하천구간별 목표수질을 유량이 저수량(275일 초과 유량)상태를 기준으로 하고 있어 하천 유량이 저수량 이하로 떨어지는 기간(90일)에는 하천 구간별로 설정된 목표수질을 만족시키기 어려운 제약을 갖고 있다. 실제 해마다 갈수기만 되면 한강, 낙동강, 금강 등 주요 수계의 하류 수질이 상수원수 수질기준 이하로 떨어져 하천수를 원수로 취수하는 상수도사업본부로부터 상류 다목적댐의 방류량 증가 요청이 자주 발생하고 있는 실정이다. 따라서, 우리나라와 같이 하상계수가 높은 하천에서는 환경기초시설을 통한 점오염원의 삭감만으로는 갈수기 동안의 수질보전이 어려우므로 유역의 수량과 수질의 통합관리 측면에서 하천의 수질상태를 고려한 댐과 하천운영이 꼭 필요하다.

본 연구의 목적은 수문상황, 오염량 부하조건, 자정능력에 따라 하천구간별로 시시각각 변하는 수질상태를 물 공급 의사결정에 고려할 수 있도록 지원하기 위한 비정상상태(unsteady state) 하천수질모형을 개발하는데 있다. 개발될 수질모형은 강우-유출모형, 실시간 저수지운영모형, 통합 데이터베이스로 구성되는 실시간 물관리운영시스템의 수질모형 부모틀로 구축함으로써, 오염물질의 누출 사고 또는 갈수기 수질악화 발생시 오염물질의 추적과 상류 댐군의 방류량 의사결정을 지원하기 위해 활용하고자 한다.

본 연구는 지속가능한 수자원확보기술 개발을 위한 21세기 프론티어 연구개발사업의 세부과제 중 '실시간 물관리 운영시스템 구축 기술 개발'의 단위과제로 추진 중이다. 1차년도(2001.11~2002.8)에는 국내외의 수질모형 기술현황을 조사하고 하천운영을 지원하기 위한 수질모형의 구축방안을 수립하였으며, 2차년도(2002.8~2003.8)에는 수질모형 구축, 3차년도(2003.8~2004.8)에는 개발된 모형의 검증과 사용자 편의환경을 구축하도록 계획되었다. 본 논문에서는 2차년도의 주요 연구결과인 금강수계에 구축한 1차원 비정상상태 하천수질모형의 매개변수 민감도분석, 수리 및 수질모듈의 보정과 검증결과를 소개한다.

2. 연구방법 및 재료

하천에서 오염물질의 이송과 확산을 해석하는 기본적인 방법으로는 Eulerian 방법과 Lagrangian 방법이 있다. Eulerian 방법은 물질수송에 관한 이송과 확산방정식을 고정된 좌표계에서 유한차분법 또는 유한요소법에 의하여 수치해를 구하는 방법이며, 반면에 Lagrangian 방법은 이동좌표계 즉, 물질좌표계에서 개개의 입자의 거동을 추적해가면서 물질수송을 해석하는 방법이다. 일반적인 수질모형(RIV1Q, EUTRO5, TOXI5)의 수질해석모듈은 Eulerian 해석법을 이용하는 경우가 대부분이지만, 일부에서는 Eulerian 방법이 갖고 있는 수치해의 진동, 불안정성, 그리고 수치확산 등의 문제점을 해결하기 위해 Lagrangian 해석방법을 도입하려는 노력들이 계속하여 이루어져 왔다(BLTM, DSM2, RIV-LAG1 등).

실시간물관리운영시스템에서 비정상상태 수질모형은 주로 댐 방류량 변화에 따른 하류 주요 취수지점 또는 수질관리지점에서의 수질농도 변화를 예측하기 위해 활용될 계획이므로 Eulerian 해석기법을 이용한 미공병단의 CE-QUAL-RIV1모형(1995)을 기본모형으로 선정하였다. RIV1 모형은 댐 방류계획 수립 등 물공급 계획변화에 따른 주요지점에서의 동적인 하천수질변화 예측과 댐운영이 수질에 미친 사후 효과분석 등에 활용될 수 있다.

1) 충북대학교 환경공학과 조교수
2) 한국수자원공사 수자원연구소 부장

RIV1 모형의 수리모들은 1차원 비선형 St. Venant 연속 및 운동량 방정식을 4점 음해적 유한차분법으로 해석한다. 수질모들은 오염물질의 물질수지식에 대해 이송항은 인접한 두 절점 사이의 공간적 농도변화를 3차 다항식으로 묘사하는 Holly와 Preissman의 4차 양해법을 적용하며, 확산항은 음해적 유한차분법으로 해석하여 Thomas algorithm으로 해를 구한다. 수질모의 항목은 온도, 용존산소, CBOD, 유기질소, NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P, 망간, 철, 대장균군수 등이며, 조류나 수생생물의 변화량도 포함되었다. 여름에 성층화로 인해 발생하는 댐 하류부의 무산소 방출수에 대한 효과를 고려하기 위해서 철과 망간이 포함된다.

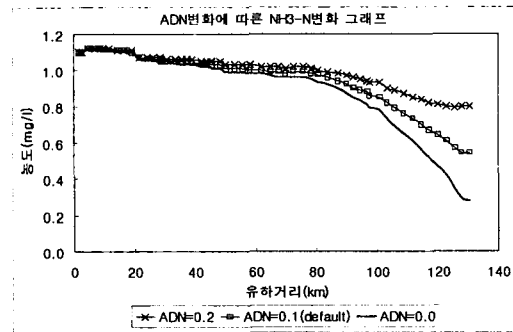
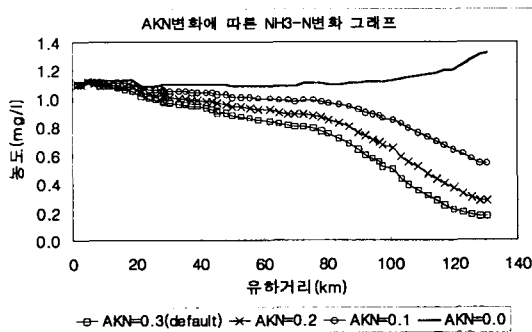
모형 구축을 위한 대상구간은 비교적 댐 방류량에 따른 하천수질의 영향이 크며, 대전과 청주공단 등 오염물질의 누출사고의 잠재성이 있는 금강수계내 대청댐 하류(대청 조정지댐 ~ 금강 하구둑) 구간을 선정하였다. 하천의 단면자료는 수리해석 해의 발산을 방지하고 안정성을 도모하기 위해 최근 금강하천정비기본계획에서 측량한 하천 단면자료를 사다리꼴 형태로 변환·정형화하여 입력자료를 재구성하였다. 전체 130.47km의 본류 하도를 56개의 node로 나누어 모형을 구성하였으며, 지류는 7개로 구성하여 지류유입량의 영향을 고려할 수 있도록 하였다.

3. 모형의 민감도 분석

수질 모듈에서는 대략 35개 정도의 매개변수를 입력해 주어야 하며, 모의 대상 항목에 따라 사용되는 매개변수가 달라진다. 수질매개변수의 민감도 분석을 위해 CBOD, Org-N, NH₃-N, NO₃-N, Org-P, PO₄-P를 모의 대상 항목으로 선정하였으며 이에 관련된 주요 매개변수를 예비 모의를 통해 <표1>과 같이 선정하였다. 민감도분석은 매개변수의 변화량에 대한 수질농도의 변화량으로 정규화하여 나타낼 수도 있지만, 농도의 절대값 변화에 대한 분석을 위해 농도 변화 값을 직접 비교하였다. 민감도 분석결과 AKN과 ADN은 NH₃와 NO₃의 농도에 큰 영향을 미치며, 하류로 갈수록 매개변수 값에 따른 영향이 크게 나타났다(그림 1).

표 1. 수질모들의 민감도 분석 대상 매개변수

| Parameter | Description | Unit | Default | Perturbation |
|-----------|----------------------|-------|---------|--------------|
| AK1 | CBOD decay rate | 1/day | 0.15 | 0.04 ~ 0.15 |
| AKN | nitrification rate | 1/day | 0.3 | 0.0 ~ 0.3 |
| ADN | denitrification rate | 1/day | 0.1 | 0.0 ~ 0.2 |
| KPSET | Org-P settling rate | - | - | 0.0 ~ 0.1 |
| KPDK | Org-P decay rate | 1/day | 0.0 | 0.0 ~ 0.1 |

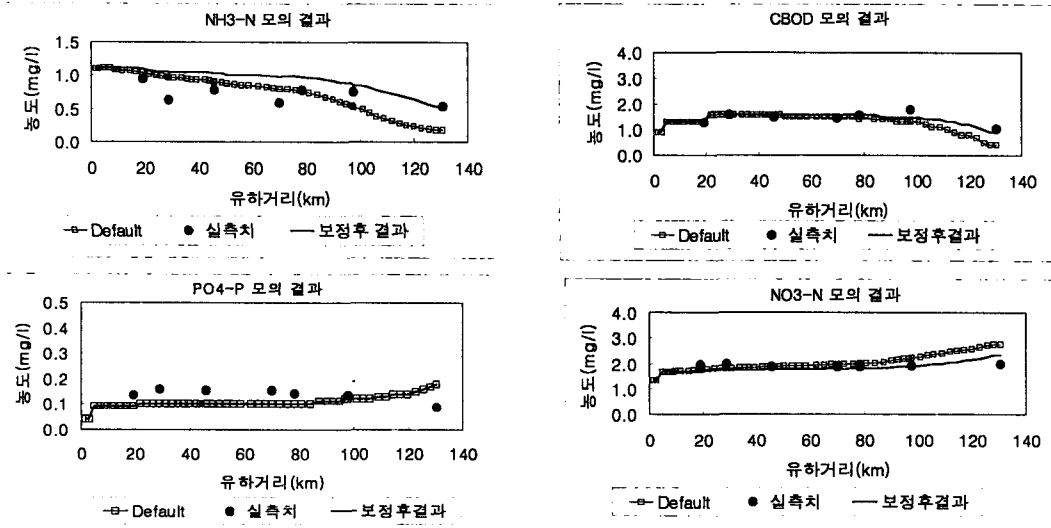


<그림 1> AKN과 ADN 변화에 따른 암모니아성 질소 농도의 민감도

4. 모형의 보정 및 검증

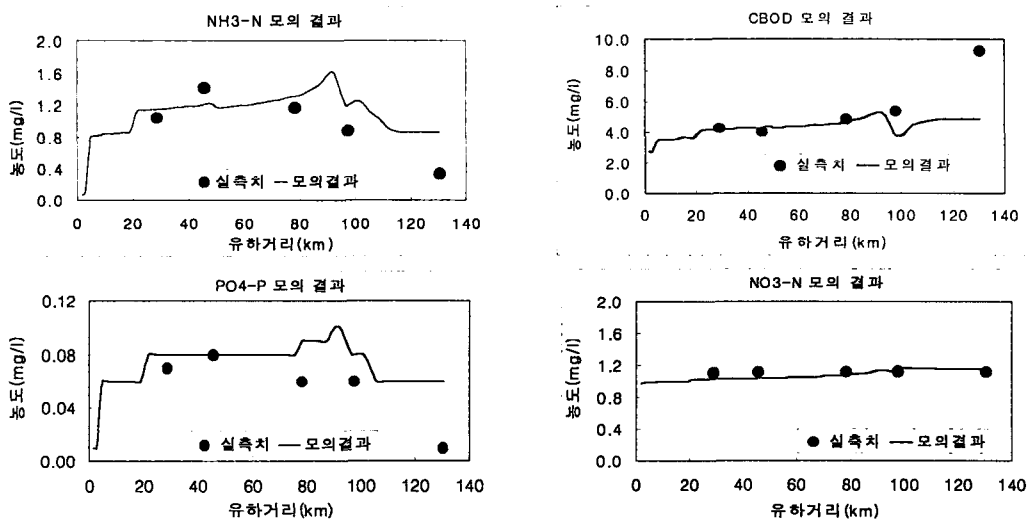
2002년 9월에 대상구간의 본류와 주요지류에서 실측한 수량과 수질 자료를 경계조건으로 이용하여 정상상태의 조건에서 모형의 매개변수를 보정하였다. 수리모들은 정상상태로 안정화시킨 뒤(모의시작 후 약 10일 소요) 모의를 수행하여 수치 해석상의 진동을 배제하였다. 보정결과의 평가를 위해 평균 제곱근 오차(RMSE)

를 사용하였다. 민감도 분석을 통해 선정된 매개변수를 보정한 결과는 AK1, AKN, ADN, KPSET, KPDK가 각각 0.08, 0.1, 0.1, 0.05, 0.04일 때 모의값이 실측값에 가장 근접하였다. 모형은 대상 하천의 구간별 수질을 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났으나, NH3-N는 실측치 보다 비교적 높게 모의되는 경향을 나타내었다(그림 2). 이는 NH3-N의 질산화과정이 수온과 pH 등에 매우 민감한 반면, 이에 대한 입력자료의 신뢰도가 떨어지기 때문인 것으로 사료된다. 또한 입력자료의 한계로 인해 조류에 대한 모의가 생략된 것도 오차의 원인이 된다.



<그림 2> 모형의 보정 결과

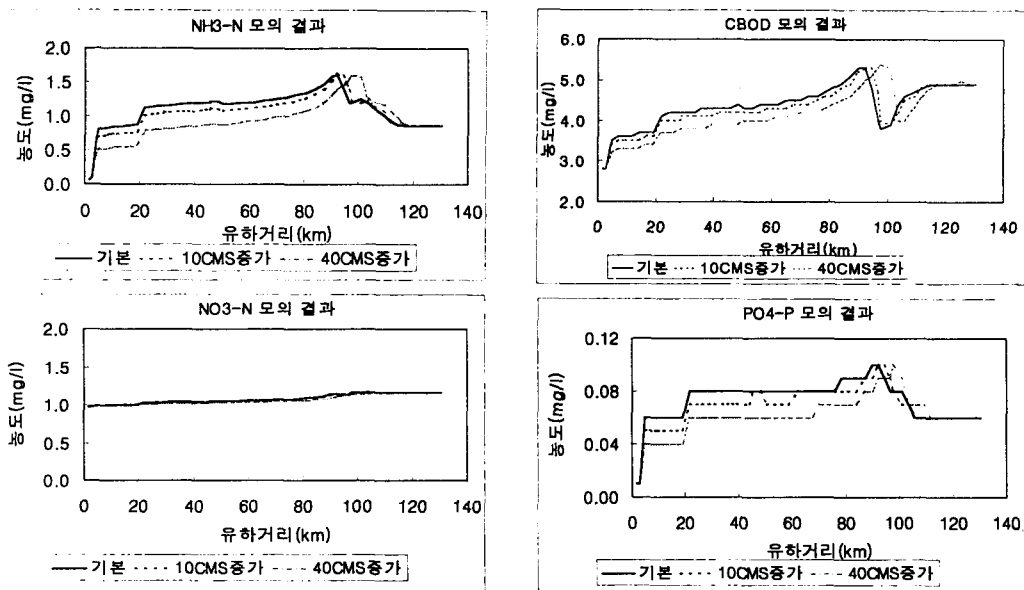
모형의 검증을 위해 1998년 12월(한국수자원공사, 1999)에 측정한 자료를 사용하였다. 정상상태 조건에서 모의한 결과(그림 3), 본 모형은 대상 하천의 수질을 비교적 잘 모의하였으나, 하구둑에서의 수질은 관측치와 모의치가 큰 편차를 보이고 있어 입력자료의 정확도와 하구에서의 수질반응 등에 대한 추가적인 검토가 필요한 것으로 나타났다. 특히, 하구둑의 호소 환경조건에서 시기적으로 조류 등 내생부하가 발생할 경우 이에 대한 조사가 면밀히 이루어져야 모형에서 구현이 가능할 것으로 판단된다.



<그림 3> 모형의 검증 결과

5. 댐 방류조건별 하류수질변동 모의해석

대청댐의 방류량 변화가 하류하천의 수질에 미치는 영향을 모의하기 위하여 검증된 모형을 적용하였다. 댐건설 이후(1981) 지난 20년간의 12월 평균 방류량인 48.7CMS를 기준유량으로 하여 댐 방류량을 각각 10CMS와 40CMS 증가시켜가며 수질 개선 효과를 모의하였다. <그림 4>는 방류량의 변화에 따른 유하거리별 수질변화를 보여주고 있으며 수질항목의 종류에 따라 정도의 차이는 있으나, 유량증가에 따른 수질개선효과가 가시적으로 나타나는 것을 알 수 있다. NH₃-N의 경우 40CMS 증가시 부여지점에서 30%의 농도저하가 발생하였다. 그러나, 질산성 질소의 농도는 댐 방류량 증가에 따른 농도변화가 매우 적은 것으로 나타났다.



<그림 4> 댐 방류량 변화에 따른 하류 수질 변화

6. 결론

1차원 비정상상태 하천수질모형을 금강수계의 대청댐~금강하구 구간을 대상으로 구축한 결과, 모형은 댐 방류량 변화에 따른 하천 수질변화를 모의하는데 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, 수질오염사고와 같은 긴급상황(emergency spill)에서의 모형평가를 위해서는 유사상황에 대한 시간단위의 수질과 수량 측정 자료의 수집과 이에 대한 모형의 추가적인 검증이 필요하다.

감사의 글

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

참고문헌

- USCOE, WES, Environmental Laboratory, "CE-QUAL-RIV1: A Dynamic, One-Dimensional (Longitudinal) Water Quality Model for Streams: User Manual," Instruction Report, 1995.
- 한국수자원공사, "대청댐 하류 오염물질 이송·확산예측 및 저감대책에 관한 연구", 1999.