

## 저수지 플러싱 방류 효과분석을 위한 비정상상태 하천수질모형의 적용

### Application of an Unsteady River Water Quality Model for the Analysis of Reservoir Flushing Effect on Downstream Water Quality

정 세 웅\*

Chung, Se Woong

#### Abstract

Since the self-purification capacity of rivers in Korea is significantly controlled by environmental maintenance flow supplied by upstream reservoirs during drought season, it is obviously important to operate the river and reservoir systems considering not only water quantity aspect but also conservation of downstream water quality and ecosystem. In this study, an unsteady river water quality model KORIV1-WIN was developed as a tool for evaluating the impact of reservoir operations on the downstream water quality. The model parameters were calibrated and verified using field data obtained in Geum River on September and October of 2002, respectively. Intensive data sampling was performed on November 22, 2003 to investigate the effect of a short-term flushing discharge of Daecheong Reservoir, which increased outflow from 30 m<sup>3</sup>/s to 200 m<sup>3</sup>/s for 6 hours, on downstream water quality. The model performance was evaluated by comparing simulated results with observed data including hydraulics, biochemical oxygen demand(BOD<sub>5</sub>), nitrogen and phosphorus species during the flushing event. It showed very good performance in predicting the travel time of flushing flow and water quality variations of dissolved forms of nitrogen and phosphorus species, while revealed large deviations for BOD<sub>5</sub> possibly due to missing the effect of organic matters resuspension from river bottom sediment during the wave front passage.

**keywords** : reservoir flushing, unsteady water quality model, dam operation, KORIV1-WIN

#### 요 지

갈수기 동안 우리나라 하천의 자정능력은 상류 댐으로부터 공급되는 하천유지유량에 큰 영향을 받으므로, 하천과 저수지시스템의 운영은 수량공급측면뿐만 아니라 하천의 수질과 생태계를 동시에 고려해야 한다. 본 연구에서는 수질사고와 악화에 취약한 갈수기 동안 다양한 댐 방류 대안이 하류 수질에 미치는 영향을 평가하기 위한 비정상상태 하천수질모형인 KORIV1-WIN을 개발하고 금강수계에 위치한 대청댐 하류구간을 대상으로 2002년 9월과 10월에 실측한 유량과 수질자료를 이용하여 보정과 검증은 각각 수행하였다. 그리고 대청댐의 단기간 플러싱 방류가 하류하천의 수질변화에 미치는 영향을 조사하기 위해 2003년 11월22일에 댐 방류량을 30 m<sup>3</sup>/s에서 200 m<sup>3</sup>/s로 6시간동안 증가시켜 수리와 수질실험을 실시하였으며, 모형의 성능을 검증하기 위해 플러싱 방류 사상 동안 하천의 수리특성과 수질변화를 모의하고 실측자료와 비교하였다. 모형은 댐 방류량의 주요지점 도달시간과 수위상승을 잘 모의하였으며, 암모니아성 질소와 용존 인 등 질소와 인계통의 수질변화도 비교적 잘 예측하였다. 그러나 탄소계 유기물질로 인

\* 충북대학교 환경공학과 조교수, 충북 청주시 흥덕구 개신동 12  
Assistant Professor, Dept. of Environmental Engineering, Chungbuk National University  
(E-mail: chung@chungbuk.ac.kr)

해 발생하는 산소요구량의 모의에서 실측자료와 큰 편차를 보였으며 이것은 댐 방류량이 하천을 통과할 때 하천 저니층으로부터 재부상한 유기물질의 영향을 모형에서 적절히 반영하지 못한 때문으로 판단된다.

**핵심용어** : 저수지 플러싱 방류, 비정상상태, 하천 수질모형, 댐 운영, KORIV1-WIN

## 1. 서론

우리나라 하천은 하상계수가 높아 갈수기에는 유역의 자연유량이 급감하여 오염물질에 대한 자정능력이 현격히 떨어져 해마다 주기적인 수질 악화 현상이 반복되고 있으며 대부분의 상수원 취수시설은 수질사고의 대응에 매우 취약한 실정이다. 따라서 댐에 의해 유량이 조절되는 하천에서는 적절한 하천유지유량의 확보는 물론이고, 하류의 수질악화와 사고에 대응한 과학적인 하천운영 기법의 도입이 절실히 요구되고 있다. 플러싱(Flushing) 방류는 댐 조절하천에서 하류하천의 수질환경과 생태계 서식환경(Tanaka, 2004)을 개선하기 위해 일시에 많은 양의 물을 방류하는 저수지 운영방법이다. Barillier 등(1993)은 프랑스 세느강에서 저수지 플러싱 방류가 하류수질에 미치는 영향을 조사한 바 있으며, 방류초기에 홍수파의 전단부가 지나가는 시기에는 하천 바닥에 퇴적되어 있던 저니층이 재 부상하여 영양염류와 용존 및 고형물질의 농도가 증가하여 산소가 많이 소모되는 경향을 보였으나 용존성물질의 농도는 급격히 저감된다는 결과를 보여주었다.

그 동안 하천수질모델링기술은 유량과 수질의 관계를 정량적으로 분석하는 틀을 제공하여 왔으며, 장·단기적인 수질변화예측과 목표수질을 달성하기 위해 필요한 하천유지유량을 산정하는데 유용하게 활용되었다. 국내에서 하천수질관리를 위해 실무적으로 가장 활발하게 적용되고 있는 모형은 미국 환경부에서 개발한 QUAL2E(Brown et al., 1987)이다. 그러나 이 모형은 상류단과 지천의 수량과 수질 경계조건이 시간에 따라 변하지 않는다고 가정하는 정상상태(steady-state) 해석 모형이므로 댐의 방류량 변화에 따른 하천의 동적 수질변화를 예측하기에는 부적합하며 호우시 도시와 농촌으로부터 유입하는 비점원 오염물질 부하와 같은 급격한 흐름변화를 해석할 수 없는 단점을 갖고 있다. 선진국에서 하천과 저수지 운영을 위한 수질예측 및 평가 도구로 활용되고 있는 대표적인 비정상상태(unsteady-state) 하천수질모형은 미공병단의 CE-QUAL-RIV1(Martin, 1986; Dortch et al., 1989; Environmental Laboratory, 1995; Martin and Wool, 2002), 미국 환경부의 WASP(Ambrose, 1993), 캘리포니아 수자원국의 DSM2(California Department of Water Resources, 2002), USGS의 BLTM(Jobson and Schoellhamer,

1987) 등이 있다. 유럽에서 개발한 MIKE 계열의 모형도 훌륭한 사용자 인터페이스를 제공하고 있으나, 소스코드가 공개되지 않으며 가격이 고가라는 단점이 있다. 국내 연구사례로써 Cho(2001)는 수력발전소의 침투방류가 남대천의 수질에 미치는 영향을 분석하기 위해 QUAL2E와 WASP5모형을 이용한 바 있다. 한건연 등(1994, 1995)은 한강 하류부의 동적 수질모의를 위해 Lagrangian 해석기법을 이용한 RIV-LAG1 모형을 개발하여 오염물질의 거동에 미치는 서해안 조석의 영향을 검토하는 데 적용하였으며, 낙동강에서는 1991년 3월에 발생한 폐놀오염 누출사고를 모의하는데 활용한 바 있다. 한국수자원공사(1996, 1999)는 하천에서의 수질사고 또는 악화시 오염물질의 이동특성에 관한 예측을 위해 부정류 해석모형(FLDWAV, UNET)과 WASP5의 EUTRO와 TOXI모듈을 결합하여 낙동강과 금강에 적용한 바 있다. 그러나 대부분의 모형은 사용자 편의성과 범용성 부족으로 인해 일회성 연구를 위한 적용에 그치고 수질모형에 대한 이론적 배경이 없는 비전문가들이 사용하기에 어려워 저수지와 하천운영 실무에 널리 활용되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구의 목적은 갈수기 동안 수질악화와 사고에 취약한 국내 댐 조절하천의 수질관리를 지원하기 위해 1차원 비정상상태(unsteady state) 하천수질모형인 CE-QUAL-RIV1 모형을 윈도체계의 그래픽 입출력프로세스로 보완한 KORIV1-WIN을 개발하고, 금강수계의 대청댐 하류구간을 대상으로 매개변수를 보정하고 검증한 후 단기간의 저수지 플러싱 방류가 하천의 수리 및 수질변화에 미치는 영향을 모의하는데 적용함으로써 모형의 실무 적용가능성을 평가하는데 있다.

## 2. 연구방법 및 자료

### 2.1 KORIV1-WIN 개발

KORIV1-WIN 모형은 미국 공병단의 하천연구센터인 Waterways Experiment Stations (WES)에서 개발한 CE-QUAL-RIV1 모형의 수리 및 수질해석 모듈을 기본모형으로 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 개발하였다(그림 1, 2)(정세웅과 고익환,

2003; 정세웅 등, 2004).

부정류 해석을 위한 수리모델의 지배방정식은 St. Venant의 연속방정식 식 (1)과 운동량방정식 (2)로 구성된다. 수리해석모델에서는 유량, 유속, 하천단면, 수위와 같은 하천의 수리학적 변수들을 계산하고 그 결과를 저장하여 수질해석모델의 입력 자료로 전달한다. 수리모델은 지하수와 같이 하천 경계를 따라 연속적으로 유입하는 측면류 흐름을 고려할 수 있으며, 여러 개의 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(Environmental Laboratory, 1995).

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

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

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

물질의 이송과 확산 그리고, 수질반응은 식 (3)과 같은 지배방정식으로 표현된다. 수질해석모델은 수온, 탄소계BOD(CBOD), 유기질소(Org-N), 암모니아성 질소(NH<sub>3</sub>-N), 질산성질소(NO<sub>3</sub>-N), 용존산소(DO), 유기 인(Org-P), 용존 인(PO<sub>4</sub>-P), 조류(Algae), 철(Fe), 망간(Mn) 및 대장균(Coliform bacteria)의 12가지 수질항목에 대한 모의가 가능하다(그림 3). 특히, 이 모델에서는 조류와 부착식물(Macrophytes)에 의한 광합성과 호흡, 장대 하천의 정체수역에서 종종 발생하는 조류에 의한 CBOD의 내생부하가 수질반응 기작에 포함되어 있다.

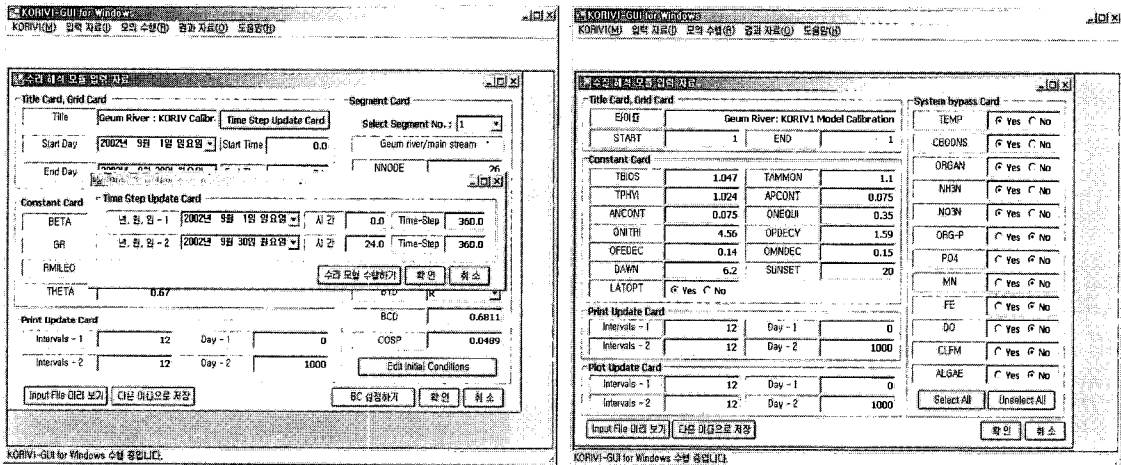


그림 1. KORIV1-WIN pre-processors for input data preparation

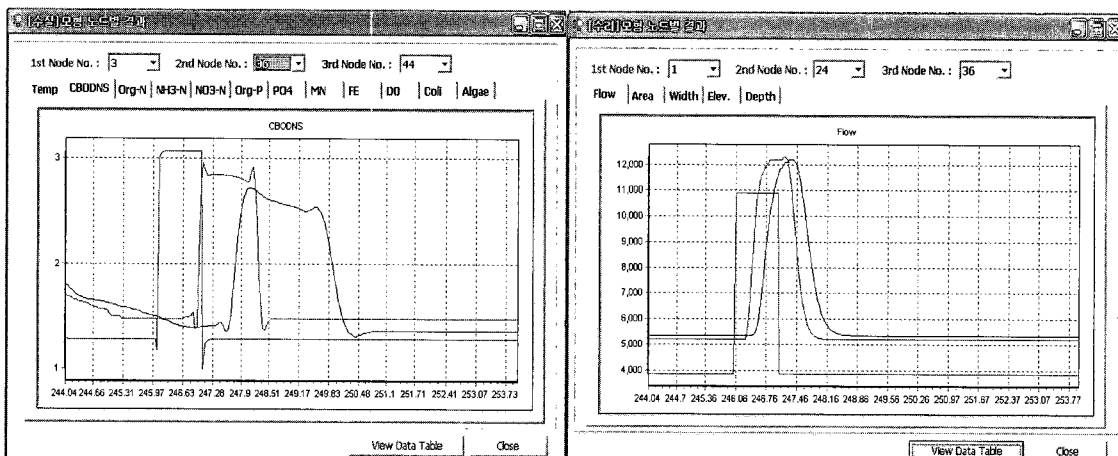


그림 2. KORIV1-WIN post-processors for graphic display of output data

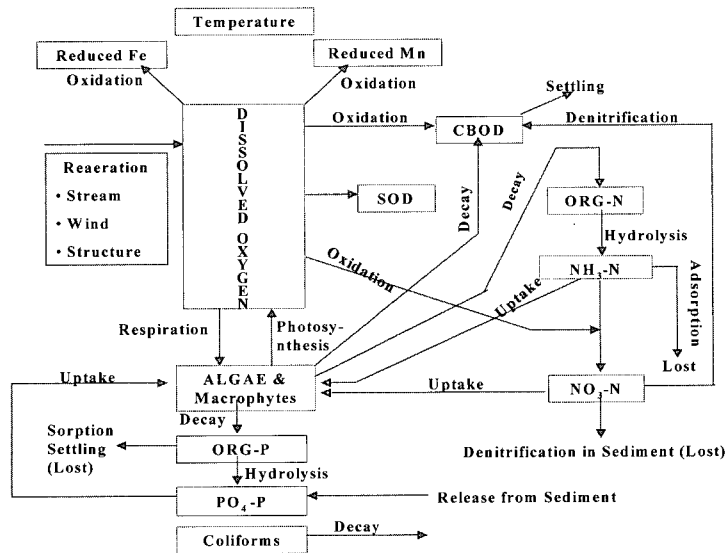


그림 3. KORIV1-WIN water quality kinetic reactions

수질지배방정식의 수치해석에서 오염물질의 이송항은 인접한 두 절점 사이의 공간적 농도변화를 3차 다항식으로 묘사하는 Holly와 Preissman의 4차 양해법을 적용하였으며, 확산항은 음해적 유한차분법으로 해석하여 Thomas algorithm으로 해를 구한다.

$$\frac{\partial(A\alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(UA\alpha)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( DA \frac{\partial \alpha}{\partial x} \right) + q\gamma + S^* \quad (3)$$

여기서  $\alpha$ 는 오염물질의 농도,  $S^*$ 는 오염원의 발생 및 소멸항,  $D$ 는 확산계수,  $\gamma$ 는 측방향 유입수의 농도이다.

## 2.2 모의대상 하천 및 현장실험

모형의 보정과 검증을 위한 모의대상 하천구간은

댐 방류량이 하천수질에 미치는 영향이 크며, 대전공단과 청주공단 등 오염물질 누출사고의 잠재성이 있는 금강 수계의 대청댐 하류구간(대청 조정지댐~금강 하구둑)을 선정하였다(그림 4). 하천의 단면자료는 수치해의 발산을 방지하고 안정성을 도모하기 위해 최근 금강하천정비기본계획(건설교통부, 2002) 수립과정에서 측량한 하천 단면자료를 사다리꼴 형태로 변환하여 입력 자료로 구성하였다. 전체 130.47km의 분류 하도를 56개의 노드로 구성하였으며, 금강 분류하천 수질오염의 주요 오염원인 대전시에서 유입하는 갑천과 청주권에서 유입하는 미호천을 포함한 주요 지류 7개를 모의에 고려하였다.

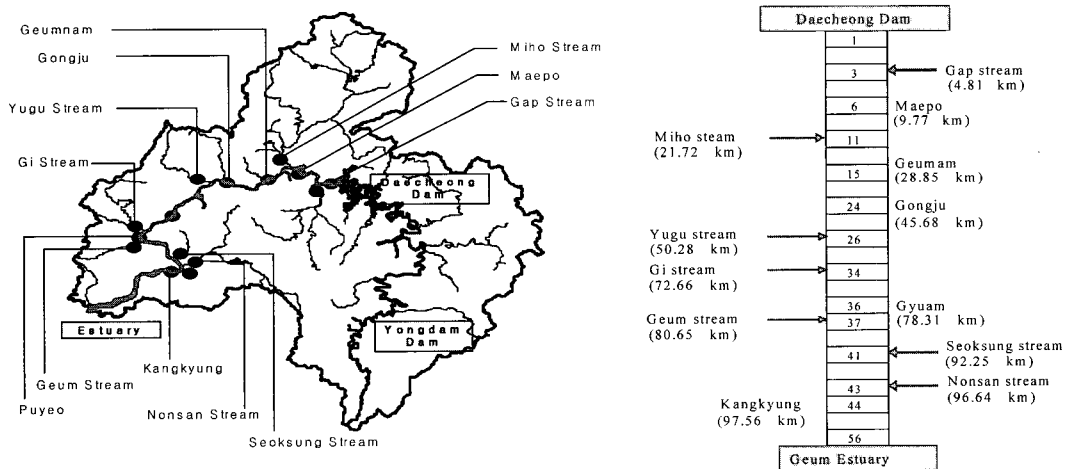


그림 4. Study reach of Geum River and computation elements for model application

매개변수 보정과 검증을 위한 자료는 2002년 9월과 10월에 대상 하천구간의 본류 7개 지점과 주요 유입지천 7개소에서 실측한 유량과 수질자료를 사용하였으며, 대청댐의 단기간 플러싱 방류에 따른 하류 하천 주요지점의 하천수위, 방류량 도달시간, 그리고 하천수질변화를 조사하기 위해 2003년 11월22일 오전 7시부터 6시간 동안에 걸쳐 대청 조정지댐의 방류량을 30 m<sup>3</sup>/s에서 200 m<sup>3</sup>/s로 단위계단함수로 증가시킨 후 뱀하류 9.77 km 지점에 위치한 매포, 28.85 km 지점인 금남, 45.68 km 지점인 공주에서 1시간 간격으로 현장실험과 샘플링을 수행하였으며, 수집된 자료는 냉장 보관하여 실험실로 옮겨 수질오염공정시험법(동화기술편집위원회, 1998)에 따라 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 모형의 보정 및 검증

모형의 보정과정에서 수리해석은 댐 플러싱 방류가 실시되기 전의 유량 경계조건에서 약 10일 정도 모의를 수행하여 정상상태로 안정시킨 후 초기조건을 재설정함으로써 수치 해석상의 진동을 배제하였다. 수질모델의 보정에 앞서 매개변수의 민감도 분석을 실시하여 보정이 필요한 매개변수를 표 1과 같이 선정하였으며 매개

변수의 보정은 실측값과 모의값의 평균 제곱근 오차(RMSE)가 최소가 될 때까지 시행착오법으로 수행하였다. 2002년 9월에 실측한 유량과 수질자료를 이용하여 정상상태의 경계조건에서 매개변수를 보정한 결과, BOD<sub>5</sub>와 질소, 인 계통의 물질에 직접적인 영향을 미치는 매개변수인 AK1, AKN, ADN, KPSET, KPDK는 각각 0.08, 0.1, 0.1, 0.05, 0.04일 때 실측값에 가장 근접하였다. 모형에서 BOD 입력자료는 최종 탄소계 BOD인 CBOD로 입력하여 계산하도록 되어있으므로, 실측자료인 BOD<sub>5</sub>(5일 BOD)를 다음 관계식으로 환산하여 입력하고 모형의 출력결과는 다시 BOD<sub>5</sub>로 재환산하여 실측자료와 비교하였다. 이때, 반응계수 k는 1차반응으로 가정하였으며 대상유역의 하수처리정도 등을 고려하여 0.15/day를 사용하였다(Chapra, 1999).

$$CBOD = \frac{BOD_5}{1 - e^{(-k*5)}} \quad (4)$$

매개변수 보정 후 모형은 모의대상 하천의 구간별 BOD<sub>5</sub>, 질소 계통, 인 계통 그리고 용존산소의 농도변화를 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다(그림 5). 그러나 갑천과 미호천이 유입하는 하천구간에서 NH<sub>3</sub>-N와 DO의 모의값이 실측값 보다 비교적 높게 모의되는 경향을 나타내었다(표 2). 이러한 결과는 실제 하천에서

표 1. Calibrated model parameters for KORIV1-WIN water quality simulation

| Parameter | Description          | Unit  | Default | Calibrated |
|-----------|----------------------|-------|---------|------------|
| AK1       | CBOD decay rate      | 1/day | 0.15    | 0.08       |
| AKN       | nitrification rate   | 1/day | 0.3     | 0.1        |
| ADN       | denitrification rate | 1/day | 0.1     | 0.1        |
| KPSET     | Org-P settling rate  | 1/day | -       | 0.05       |
| KPDK      | Org-P decay rate     | 1/day | -       | 0.04       |

표 2. Statistics indicating the model performance in calibration and verification phases

| Constituent        | Calibration phase                     |                           | Verification phase      |             |
|--------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|
|                    | Forecasting bias <sup>1)</sup> (mg/L) | RMSE <sup>2)</sup> (mg/L) | Forecasting bias (mg/L) | RMSE (mg/L) |
| BOD <sub>5</sub>   | 0.053                                 | 0.105                     | 1.021                   | 1.611       |
| DO                 | -0.928                                | 1.966                     | 0.170                   | 1.265       |
| Organic N          | 0.286                                 | 0.436                     | -1.588                  | 4.201       |
| NH <sub>3</sub> -N | -0.172                                | 0.221                     | -0.253                  | 0.333       |
| NO <sub>3</sub> -N | 0.148                                 | 0.209                     | 0.097                   | 0.183       |
| Organic P          | -0.015                                | 0.045                     | 0.029                   | 0.047       |
| PO <sub>4</sub> -P | 0.039                                 | 0.046                     | -0.005                  | 0.723       |

1) Forecasting bias,  $B_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [y_i - \bar{y}_i]$

2)  $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2}$

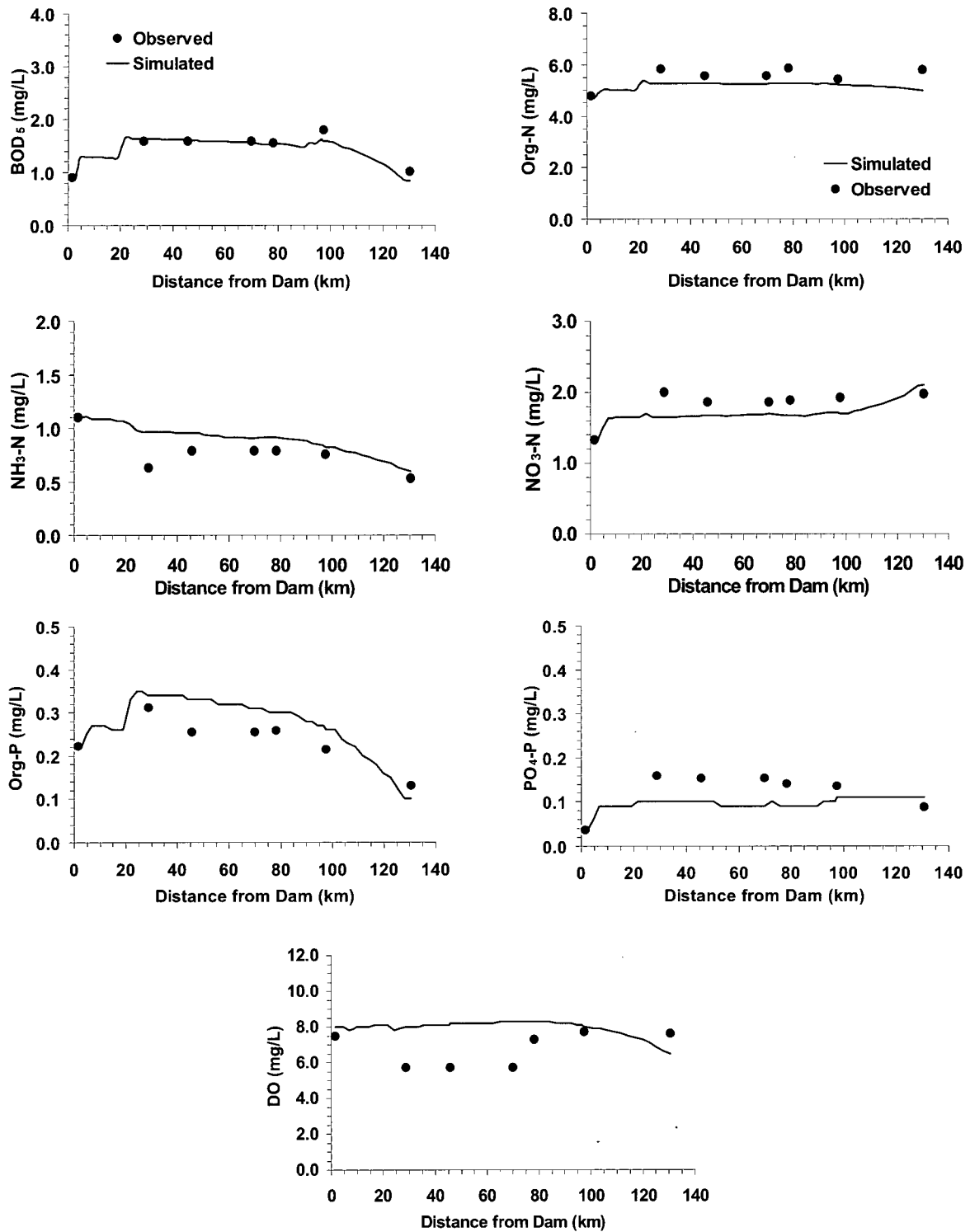


그림 5. Model calibration results using field data observed on September, 2002

NH<sub>3</sub>-N의 질산화 과정이 시간에 따라 변하는 수온 등에 매우 민감하게 영향을 받지만, 모형에서는 자료의 부족으로 이러한 요인을 정확하게 반영할 수 없었기 때문으로 판단된다.

보정된 매개변수의 검증을 위해 2002년 10월에 측정

한 유량과 수질자료를 사용하여 모의를 수행하였다(그림 6). 모형은 Org-N을 제외한 모든 수질항목에서 대체로 실측값과 전반적으로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 논산천이 유입한 이후(댐으로부터 약 97km 하류)부터 하구둑까지의 BOD<sub>5</sub>와 NH<sub>3</sub>-N 농도는 실측

값과 모의결과가 비교적 큰 편차를 보이고 있어 파악되지 않은 오염원의 유입, 정체수역인 하구둑 수체에서의 수질반응 등에 대한 추가적인 검토가 필요한 것으로 보인다. Org-N의 경우 하천 전 구간에서 모의결과는 실측값을 훨씬 상회하고 있으며, 10월에 실측한 Org-N의

농도가 9월에 실측한 농도의 30% 수준으로 급격히 떨어진 것을 제대로 반영하지 못하고 있다. 이러한 현상이 모형의 결함인지 실험결과의 신뢰도 문제인지 판단하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

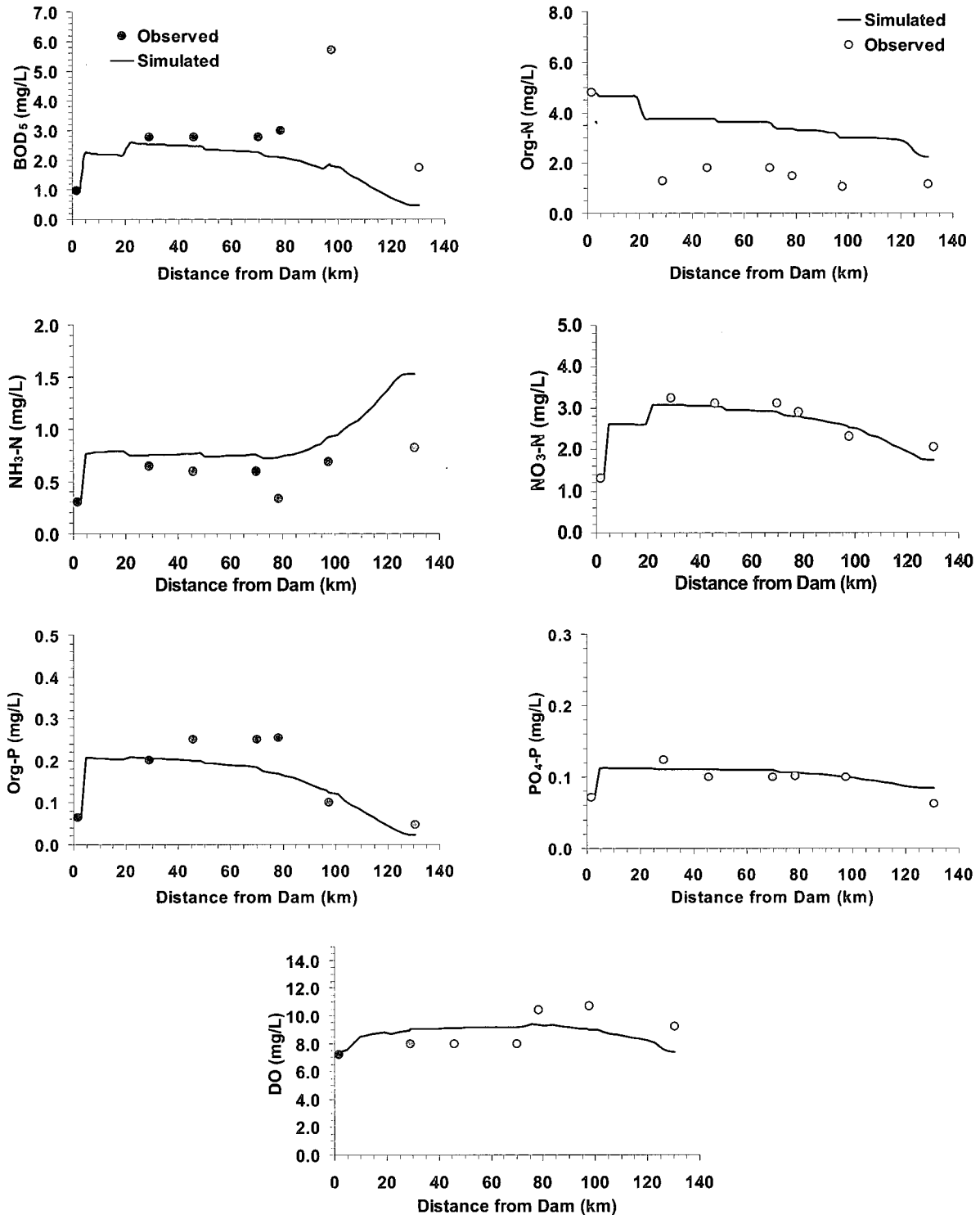


그림 6. Model verification results using field data observed on October, 2002

### 3.2 저수지 플러싱(Flushing) 효과 모의

상류 댐의 플러싱 방류에 따른 홍수파의 하류 주요 지점 도달시간과 하천 수질에 미치는 영향을 조사하기 위해 2003년 11월 22일 오전 7시부터 대청댐 방류량을 30 m<sup>3</sup>/sec에서 200 m<sup>3</sup>/sec로 증가하여 6시간 동안 유지하였다. 댐 방류수와 하류 본류의 매포(9.77 km 지점), 금남(28.85 km 지점), 공주 (45.68 km 지점) 그리고 주요 지류인 갑천과 미호천에서 각각 시간별 유량과 수질을 측정하여 초기 및 경계조건 자료로 사용하여 모의한 계산값과 실측값을 비교하였다.

그림 7은 KORIV1-WIN의 수리모듈에서 모의한 주요지점의 수위와 댐 방류량 도달시간을 실측자료와 비교한 것이다. 금남지점은 실험기간 동안 수위계가 작동하지 않아 자료가 결측되어 실측값과의 비교를 생략하였다. 대청 조정지댐에서의 방류량은 11월 22일 오전 9시에 최대 227 m<sup>3</sup>/sec였으며, 실측한 첨두유량이 하류 매포지점과 공주지점에 도달한 시간은 각각 오전 11시 (2시간 소요)와 오후 9시 (12시간 소요)로 나타나 모형의 수리해석결과와 매우 잘 일치하고 있다.

그러나 모형의 계산수위는 실측수위보다 대체로 0.2~0.3 m 높게 계산되고 있는 것으로 나타났다. 이러한 오차의 주요원인은 댐 방류시기가 갈수기이므로 하류로 전달되는 과정에서 수량의 하도손실이 크게 일어났기 때문으로 판단된다. 갈수기 동안 댐 방류량의 하류 도달시간은 용수공급 계획 수립과 수질사고 대응에

매우 중요한 정보이지만, 지금까지 현실적인 어려움으로 실험적인 연구가 이루어지지 않았다. KORIV1-WIN의 수리모듈은 댐 방류량의 도달시간과 수위 상승효과를 검토하는데 매우 유용하게 활용가능하다고 판단된다.

저수지 플러싱 방류의 도달에 따른 하류 매포와 금남지점의 BOD<sub>5</sub>, 질소, 인 계통의 수질농도 변화를 모의 결과와 비교하여 그림 8과 9에 각각 나타내었다.

하천에서 탄소계 유기물의 분해에 필요한 산소요구량인 BOD<sub>5</sub>는 댐 방류 초기에 급격히 증가하였다가 다시 안정화되는 경향을 나타내었으나, 모형은 이러한 순간적인 변화를 모의하는데 한계를 보였다. 댐 방류수가 도달하는 초기에 BOD<sub>5</sub>의 농도가 급격히 증가한 것은 홍수파의 전단부가 지나가면서 장기간 하천바닥에 퇴적되어 있던 저니층의 유기물질들이 재 부상한 때문인 것으로 판단된다. 따라서 갈수기 동안 BOD<sub>5</sub>의 수질농도를 개선하기 위해 저수지 플러싱을 실시하고자 할 경우에는 저니층 부유물질의 재부상 영향을 신중히 고려해야 할 것으로 사료된다. 용존성 질소계통의 물질인 NH<sub>3</sub>-N의 농도는 플러싱 방류에 매우 민감하게 반응하였으며 댐 방류량이 도달함과 동시에 희석효과로 인해 급격한 농도 저하를 가져왔다. 암모니아성 질소와 총 질소의 수질 모의결과와 실측값과 매우 잘 일치하였다. 인계통도 역시 댐 방류량 증가에 따라 농도가 현격히 떨어지는 경향을 보이고 있으며, 특히 용존 인(PO<sub>4</sub>-P)은 매우 민감하게 반응하였으며 모의결과와도 비교적 잘 일치하였다.

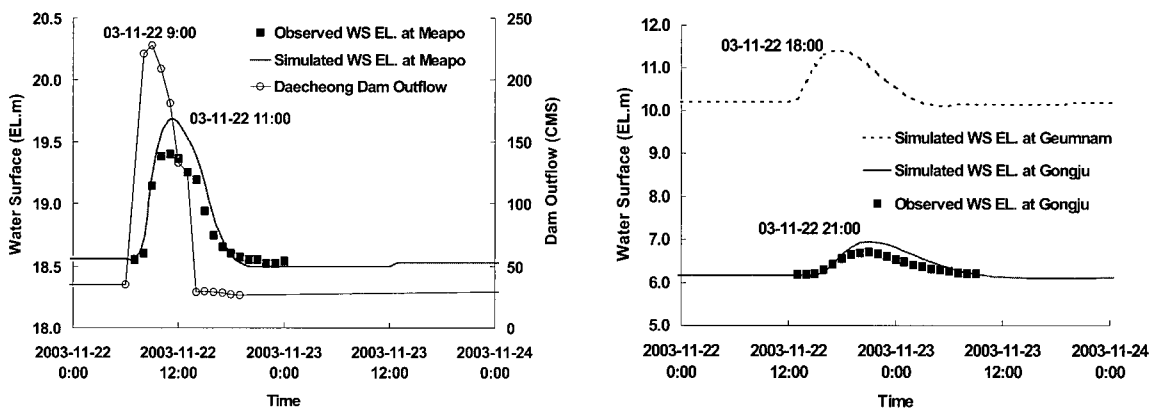


그림 7. Comparisons of observed and simulated water surface elevations at selected sampling stations, and dam outflow data used as upstream boundary conditions



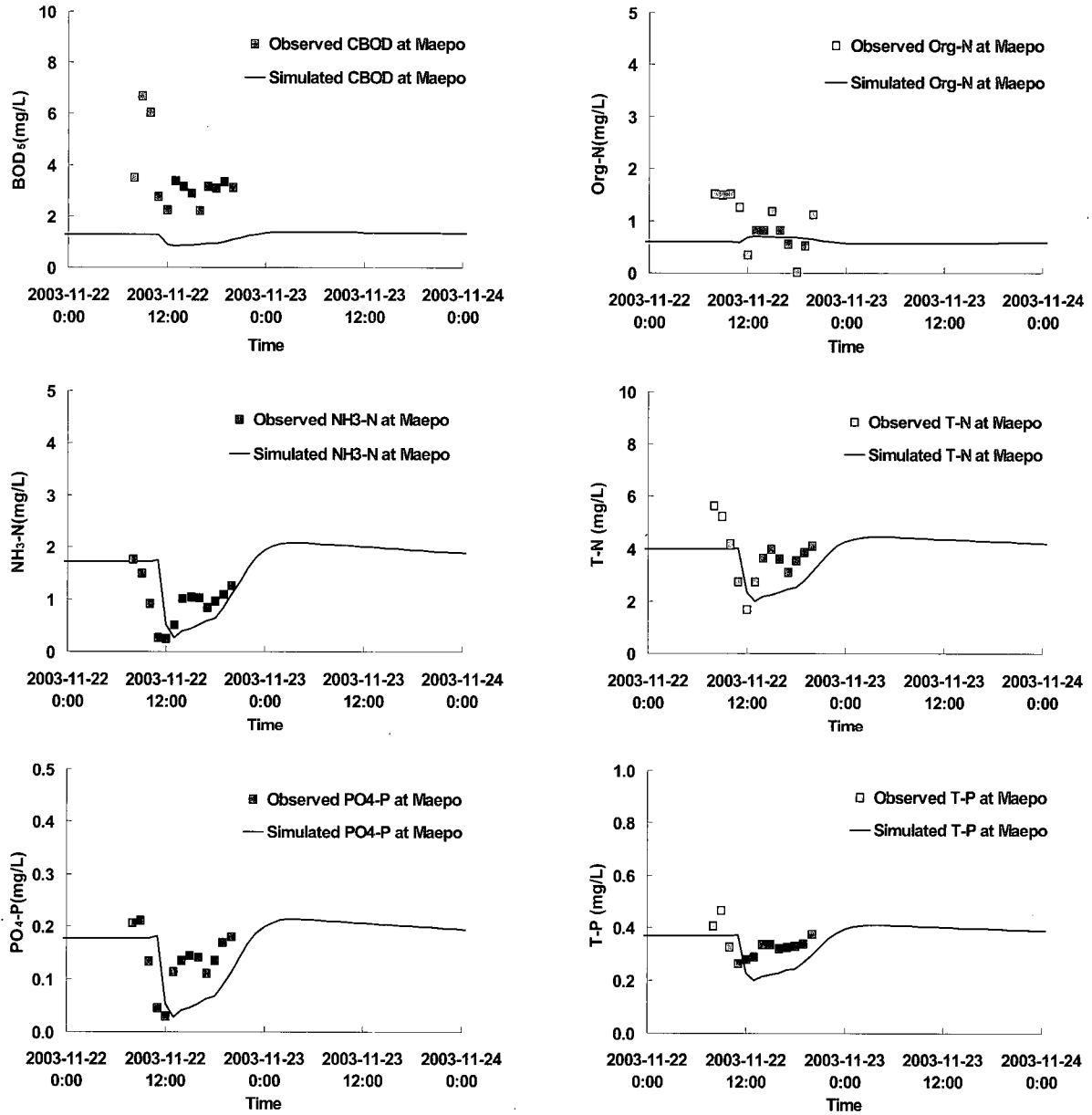


그림 8. Observed and simulated water quality variations at Maepo during flushing

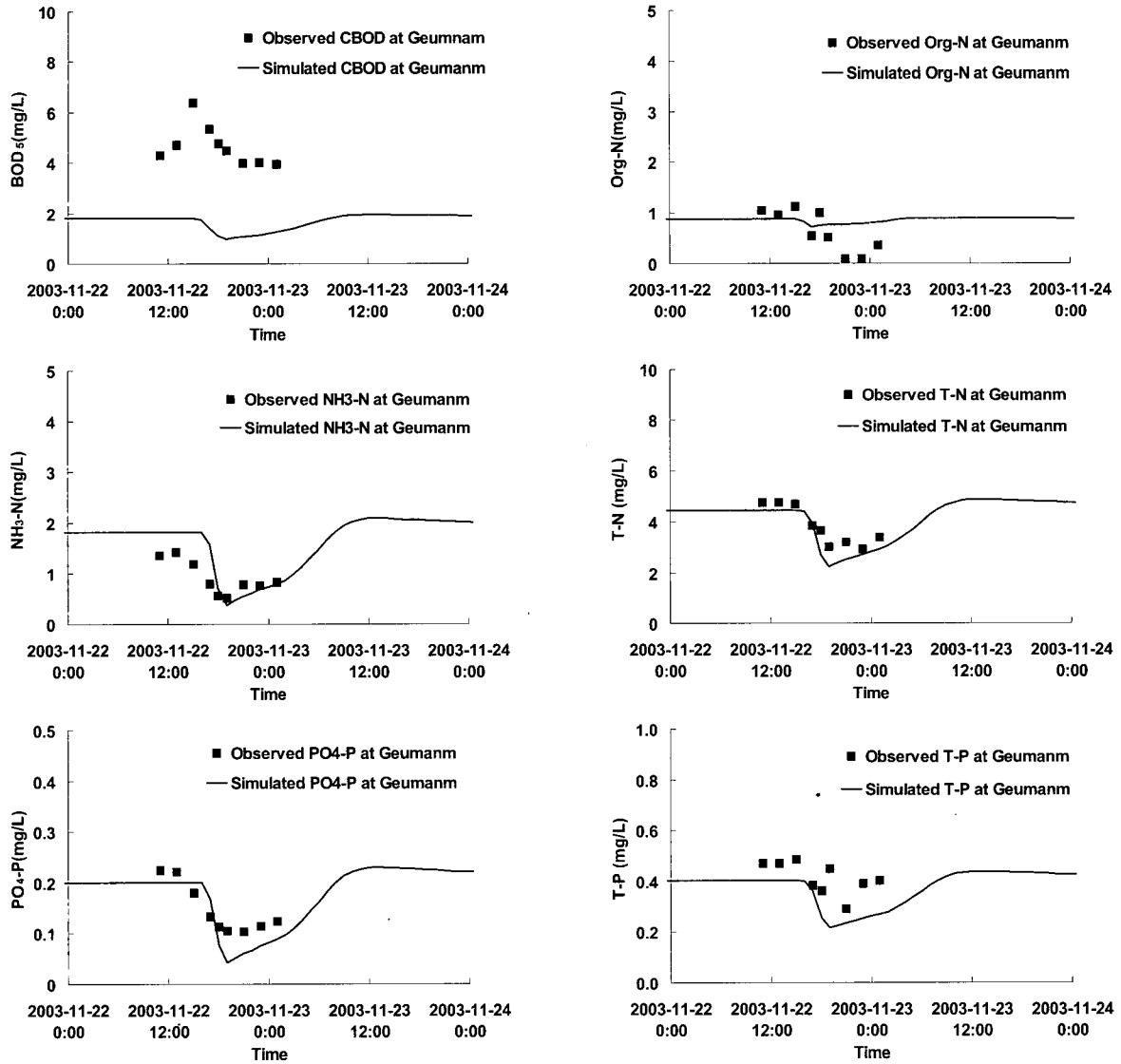


그림 9. Observed and simulated water quality variations at Geumnam during flushing

#### 4. 결 론

본 연구에서는 갈수기 동안 주기적인 수질악화와 수질사고에 취약한 댐 하류하천의 수질관리를 지원하기 위해 1차원 비정상상태(unsteady state) 하천수질 모형인 CE-QUAL-RIV1 모형을 윈도체계의 그래픽 입출력프로세스로 보완하여 KORIV1-WIN을 개발하였다. 금강수계의 대청댐 하류구간을 대상으로 매개변수를 보정하고 검증한 후 대청댐의 단기간 플러싱 방류가 하류 주요지점의 수리 및 수질변화에 미치는 영향을 평가하는데 모형을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 수질모듈의 보정결과, BOD<sub>5</sub>와 질소, 인 계통의 물질에 직접적인 영향을 미치는 매개변수인

AK1, AKN, ADN, KPSET, KPDK는 각각 0.08, 0.1, 0.1, 0.05, 0.04일 때 실측값에 가장 근접하였다.

(2) 정상상태 조건에서 수행된 모형의 보정과 검증 과정에서 모의결과는 실측값과 비교적 잘 일치 하였으나, Org-N 등 일부 수질항목은 특정 하천구간에서 실측값과 모의결과가 비교적 큰 편차를 보이고 있어 파악되지 않은 오염원의 유입, 정체수역인 하구둑 수체에서의 수질반응 등에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 보인다.

(3) 대청댐의 단기 플러싱 방류(30 m<sup>3</sup>/s에서 200 m<sup>3</sup>/s로 6시간 유지)는 하류 주요지점의 암모니아성 질소와 용존 인 등 용존성 질소와 인계통의 수질농도를 급격히 저하시켰으며 모형의 방류

량의 도달시간과 수질개선효과를 비교적 잘 예측하였다.

- (4) 그러나 BOD<sub>5</sub>의 모의결과는 실측값과 큰 편차를 보였으며, 이러한 오차는 하천 바닥으로부터 재부상한 유기물질의 영향 때문으로 판단되며, 갈수기 동안 BOD<sub>5</sub>의 수질농도를 개선하기 위해 저수지 플러싱을 실시하고자 할 경우에는 이러한 현상을 신중히 고려해야 할 것으로 사료된다.
- (5) 개발된 모형은 댐에 의해 유량이 조절되는 하천의 수질악화와 사고시 적절한 플러싱 방류계획 수립을 지원하는 도구로 활용가능하며, 유역모델과 연계할 경우 강우-유출에 의한 초기 비점오염물질 유입에 따른 동적 하천 수질변동을 해석하는데 활용 가능할 것으로 사료된다.

## 5. 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-1)에 의해 수행되었습니다. 이와 관련된 분들에게 감사드립니다. 그리고 현장실험에 협조해 주신 한국수자원공사 관계자분들과 충남대학교 서동일 교수님께 감사사를 드립니다.

## 6. 참고문헌

건설교통부 (2002). 금강수계 하천정비기본계획.  
동화기술편집위원회 (1998). 수질오염, 대기오염, 토양오염 공정시험법.  
정세웅, 고익환 (2003). “수량·수질 통합 하천운영 지원을 위한 하천수질모형 구축” 한국수자원학회 학술발표회논문집(1), pp.373-376.  
정세웅, 고익환, 김남일 (2004). “1차원 비정상상태 하천 수질모의를 위한 KORIV1-WIN 개발” 2004년도 한국수자원학회 학술발표회논문집, p.108.  
한건연, 김광섭 (1995). “낙동강 유역에서의 독성오염물 배출에 따른 수질해석 모형의 개발.” 한국수자원학회지 28(1), pp. 57-69.  
한건연, 김광섭, 박재홍 (1994). “하천으로 유입된 오염물의 유동해석을 위한 동력학적 모형의 개발.” 한국수문학회지 27(4), pp. 145-154.  
한국수자원공사 (1999). 대형댐 하류 오염물질 이송확산예측 및 저감대책에 관한 연구.  
한국수자원공사(1996). 대하천에서의 오염물질 이송확산과 저감대책에 관한 연구.

*Water Quality Analysis Simulation Program, WASP5*, U.S. Environmental Protection Agency, Center for Exposure Assessment Modeling, Athens, GA, USA.

Barillier, A., Garnier, J., and Coste, M. (1993). "Experimental reservoir water release: Impact on the water quality on a river 60 km downstream (upper seine river, France), *Wat. Res.*, Vol. 27, No. 4, pp.635-643.  
Brown, L. C., Barnwell, T. O. Jr. (1987). *The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual*, Environmental Research Laboratory Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia  
California Department of Water Resources (2002). DSM2 Tutorial: An introduction to the Delta Simulation Model II (DSM2) for simulation of hydrodynamics and water quality of the Sacramento-San Joaquin Delta.  
Chapra, S. C. (1999). *Surface Water-Quality Modeling*, McGraw-Hill  
Cho, Jae-Heon (2001). "The impact of hydroelectric power plant discharge on the water quality of the Namde River." *Environ. Eng. Res.* Vol 6, No. 3, pp.123-130.  
Environmental Laboratory (1995). *CE-QUAL-R1V1: A Dynamic, One-Dimensional(Longitudinal) Water Quality Model for Streams User's Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Waterway Experiment Station, MS, USA.  
Jobson H. E., and Schoellhamer, D. H. (1987). *Users manual for a Branched Lagrangian Transport Model*, U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 87-4163.  
Martin, J. L., and McCutcheon, S. C. (1999). *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*, CRC Press, Inc.  
Martin, J. L., and Wool, T. (2002). *A dynamic one-dimensional model of hydrodynamics and water quality EPD-R1V1 User's Manual*.  
Schnoor, J. L. (1996). *Environmental Modeling: Fate and transport of pollutants in water, air, and soil*, John Wiley & Sons, Inc.  
Tanaka, N., Osugi, T., Nanami, Y., Okano, M. (2004).

"Methods of environmental restoration for downstream of dams," *In Proceedings for Symposium on Environmental Considerations for Sustainable Dam Projects*, ICOLD 72nd Annual Meeting, May

16-22, 2004, Seoul, Korea. p.45.

(논문번호:04-70/접수:2004.07.14/심사완료:2004.09.14)