

상류 댐 플러싱 방류가 금강의 겨울철 암모니아성 질소 농도 저감에 미치는 효과분석

정세웅[†] · 김유경

충북대학교 환경공학과

Impact of a Flushing Discharge from an Upstream Dam on the NH₃-N Concentrations during Winter Season in Geum River

Se Woong Chung[†] · Yu-kyung Kim

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University
(Received 27 June 2005, Accepted 24 August 2005)

Abstract

A high ammonia nitrogen (NH₃-N) concentration has been recursively observed every winter season in Geum River, which hindered chemical treatment processes at a water treatment plant. A flushing discharge from Daecheong Dam was often considered to dilute NH₃-N, but information on the quantitative effect of flushing on the downstream water quality was limited. In this study, the impact of a short-term reservoir flushing on the downstream water quality was investigated through field experiments and unsteady water quality modeling. On November 22, 2003, the reservoir discharge was increased from 30 m³/sec to 200 m³/sec within 6 hours for the purpose of the experiment. The results showed that flushing flow tends to reduce downstream NH₃-N concentrations considerably, but the effectiveness was limited by flushing amount and time. An unsteady river water quality model was applied to simulate the changes of nitrogen concentrations in response to reservoir flushing. The model showed very good performance in predicting the travel time of flushing flow and the effect of flushing discharge on the reduction of downstream NH₃-N concentrations at Maepo and Geumnam site, but a significant discrepancy was observed at Gongju site.

keywords : Flushing discharge, Ammonia nitrogen, Unsteady river water quality model, River water quality management

1. 서론

겨울철에 금강의 중·하류 하천에서는 갑천과 미호천으로 유입되는 대전과 청주지역의 대규모 하수처리장 방류수의 영향으로 암모니아성 질소(NH₃-N) 농도가 주기적으로 높게 검출되고 있다. 그 원인은 겨울철에 수온이 강하함에 따라 질산화 박테리아의 활동이 위축되어 암모니아성 질소가 질산성 질소로 산화되는 질산화 작용이 제한받기 때문이다. 또한 갈수기에 자연유량이 감소함으로 인한 하천 자정능력 저하도 농도증가를 가속하는 것으로 보인다. 이러한 현상은 하천수질에 나쁜 영향을 줄 뿐만 아니라 정수장의 화학적 정수처리 공정에도 지장을 초래한다(한국수자원공사, 2000; 정 등, 2001; Chung et al., 2002).

플러싱(Flushing) 방류는 댐 조절하천에서 하류하천의 오염물질 누출사고에 대응하기 위해서 또는 수질환경과 생태계 서식환경(Tanaka et al., 2004)을 개선하기 위해 일시에 많은 양의 물을 방류하는 저수지 운영방법이다. Barillier 등(1993)은 프랑스 세느강에서 저수지 플러싱 방류가 하류

수질에 미치는 영향을 조사한 바 있으며, 방류초기에 홍수파의 전단부가 지나가는 시기에는 하천바닥에 퇴적되어 있던 저니층이 재 부상하여 영양염류와 용존 및 고형물질의 농도가 증가하여 산소가 많이 소모되는 경향을 보였으나 용존성물질의 농도는 급격히 저감되었다.

금강에서도 대형댐 하류 상수원의 NH₃-N 농도의 일시적인 저감을 위해 종종 플러싱 방류가 검토되었다. 목표수질을 만족하기 위해 필요한 적절한 댐 방류량을 결정하기 위해 다중회귀모형과 신경망모형과 같은 통계형 모형들을 개발하여 적용하였다(정, 2003a; 정 등, 2003b; Chung et al., 2002, 2004). 그러나 통계형 모형은 유역의 오염부하특성과 수체의 수질반응특성이 통계적으로 정상성(stationary)을 유지한다는 가정에 근거를 두고 있어 유역의 오염부하 변동과 다양한 댐 방류량 변화에 따른 주요지점에서의 동적인 질소농도 저감 효과를 정량적으로 분석하는데 어려움이 있다.

오염물질의 이송·확산, 그리고 물리적, 화학적, 생물학적 반응을 수치해석기법을 이용하여 동적으로 해석하는 비정상상태 하천수질모델은 댐 방류량과 수질의 관계를 정량적으로 분석하는데 유용하게 활용될 수 있다. 국내 연구사례

[†] To whom correspondence should be addressed.
schung@chungbuk.ac.kr

로써 Cho(2001)는 수력발전소의 침투방류가 남대천의 수질에 미치는 영향을 분석하기 위해 QUAL2E와 WASP5모형을 이용한 바 있다. 한 등(1994, 1995)은 한강 하류부의 동적 수질모의를 위해 Lagrangian 해석기법을 이용한 RIV-LAGI 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 악화 시 오염물질의 이동특성에 관한 예측을 위해 부정류 해석모형(FLDWAV, UNET)과 WASP5의 EUTRO와 TOXI모듈을 결합하여 낙동강과 금강에 적용한 바 있다. 정 등(2003c, 2004)은 국내 댐 조절하천의 수질관리를 지원하기 위해 미공병단에서 개발한 CE-QUAL-RIV1(Environmental Laboratory, 1995; Martin et al., 2002) 모형을 원도체계의 그래픽 입출력프로세스로 보완한 KORIV1-WIN을 개발하고 대청댐 하류하천을 대상으로 모형을 보정하고 검증하였다.

본 연구의 목적은 대청댐의 단기간 플러싱 방류가 하류 하천의 질소 농도변화에 미치는 영향을 현장실험을 통해 조사하고, 1차원 비정상상태 하천수질모형을 적용하여 다양한 댐 방류시나리오가 하천의 암모니아성질소 농도 저감에 미치는 효과를 분석하는데 있다. 이를 위해 2003년 갈수기 동안 댐 방류량을 30 m³/sec에서 200 m³/sec로 6시간동안 증가시킨 후 수리 및 수질실험을 실시하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구 대상지역 및 수질문제

본 연구의 대상하천은 금강수계에 위치한 대청댐 하류 하천구간이다. 댐으로부터 약 76 km 하류에 위치한 부여 지점에는 S정수장의 원수를 취수하는 취수장이 위치하고 있다(Fig. 1).

지난 10년간 일별로 측정된 원수의 NH₃-N 농도를 살펴 보면, 겨울철 동안 NH₃-N 농도는 음용수 수질기준인 0.5 mg/L 보다 5~10배 정도 높게 검출되었으며 이것은 S정수장의 화학적 정수처리 공정에 많은 어려움을 주고 있다

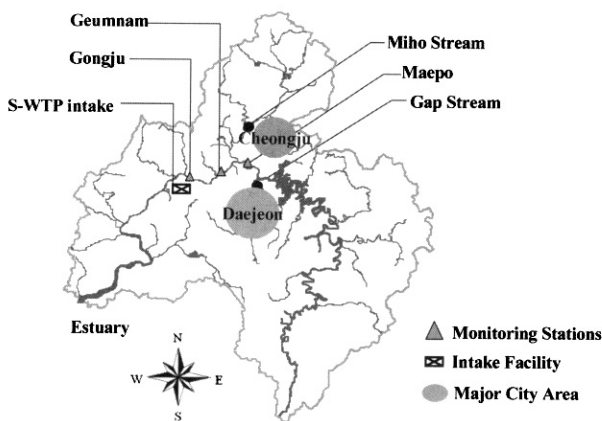


Fig. 1. Study site and locations of sampling stations.

(Fig. 2). 특히, 지난 1995~1996년 가뭄기간에는 2년 연속으로 1월에서 3월 사이에 NH₃-N 농도가 음용수 수질기준의 6배에 해당하는 3.0 mg/L 보다 높게 나타났다. 최근 2002년에도 비슷한 현상이 나타났다. 이 기간 동안 질소처리를 위한 염소투입량 증가, 트리할로메탄과 같은 소독부산물 발생, 시설물 부식, pH 및 알칼리도 저하에 따른 보조약품 추가투입, 잉여슬러지 발생 등 정수처리과정 과정에서 다양한 어려움을 겪었다(한국수자원공사, 2000).

Fig. 3은 1999년~2002년 사이의 부여지점에서 측정된 일별 암모니아성 질소농도를 수온과 함께 도시한 것이다. 하천에서 암모니아성 질소의 농도는 겨울철에 온도가 10~12°C 이하로 떨어질 때 급격히 증가하는 경향이 있다. 그러나 온도가 회복되는 기간에는 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 수온이 10~12°C 이하로 떨어지면 질산

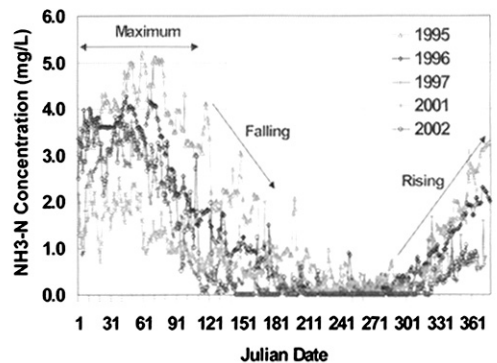


Fig. 2. Observed daily NH₃-N concentrations for selected years in Geum River.

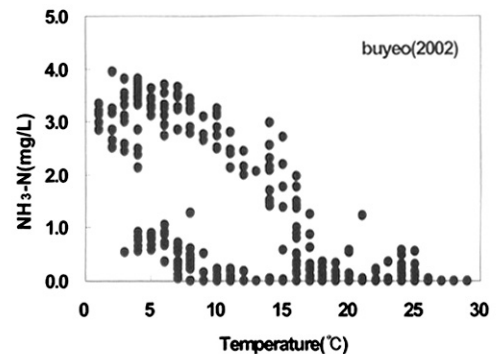
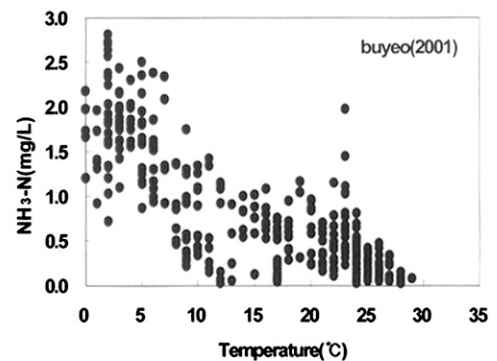


Fig. 3. Characteristics of NH₃-N concentrations as a function of water temperature; NH₃-N dramatically increase as water temperature drop below around 10°C.

화 박테리아의 활동이 급격히 둔화되며, 수온이 상승하더라도 미생물의 활동도가 회복되기까지 일정한 시간이 소요되기 때문인 것으로 판단된다. 높은 NH₃-N 농도는 특정 수소 이온농도(pH) 상태에서 생물체에 독성이다(Chapman, 1992). 보통 물속에 존재하는 암모니아는 이온화되지 않은 형태의 암모니아(NH₃)와 이온화된 암모니아, 즉 암모늄 이온(NH₄⁺)이 평형을 이루고 있다. 총 암모니아 농도는 이 두 가지 형태의 농도 값을 합한 값이다. 암모니아는 또한 여러 가지 금속이온과 결합된 형태로 존재하기도 하고 콜로이드성입자, 부유물질, 그리고 하천바닥 퇴사에 흡착되기도 한다. 본 연구의 대상지점인 부여지점에서 NH₃-N 농도가 갈수기 동안 높게 나타나는 원인은 금강 본류의 주요 지류 하천인 갑천과 미호천으로 유입하는 대전권과 청주권의 대형 하수처리장 방류수 때문인 것으로 분석되고 있다(한국수자원공사, 1999).

2.2. 실험방법

대청댐의 단기간 플러싱 방류에 따른 하류 하천 주요지점의 하천수위, 방류량 도달시간, 그리고 질소계통 물질의 수질 농도변화를 조사하기 위해 2003년 11월 22일 오전 7시부터 6시간 동안에 걸쳐 대청 조정지댐의 방류량을 30 m³/sec에서 200 m³/sec로 단위계단함수로 증가시킨 후 조정지댐 방류수와 댐 하류 9.77 km 지점에 위치한 매포(Maepo), 28.85 km 지점인 금남(Geumnam), 45.68 km 지점인 공주(Gongju)에서 1시간 간격으로 현장실험과 샘플링을 하였다. 샘플링은 하천의 흐름 중심이 위치한 교량 지점에서 채수통을 이용하였으며, 매포지점은 교량이 없어 흐름이 있는 하천 좌안 지점을 선정하였다. 수집된 시료는 냉장 보관하여 즉시 실험실로 옮겨 Standard Methods (APHA, 1998)에 제시된 분석법에 따라 측정하였다. 플러싱 방류 6시간 동안 댐 방류수의 질소농도는 Org-N 0.72 mg/L, NH₃-N 0.05 mg/L, NO₃-N 0.95 mg/L였다. 또한 본류하천의 주요 오염원인 갑천과 미호천으로부터 유입하는 하천수의 유량과 수질을 동시에 측정하여 경계조건 자료로 활용하였다. 갑천의 질소농도는 Org-N 0.22 mg/L, NH₃-N 6.64 mg/L, NO₃-N 3.68 mg/L로써 암모니아의 농도가 댐 방류수 보다 훨씬 높았다. 현장 샘플링의 시작 및 종료시간을 예측하기 위해 사전에 1차원 비정상상태 하천수질모형인 KORIV1-WIN 으로 실험상황을 모의하여 댐 방류량의 도달시간을 계산함으로써 현장실험 인력을 효과적으로 배치할 수 있었다.

2.3. 하천수질예측 모형

플러싱 방류에 따른 하천 질소농도 변화를 모의하기 위해 KORIV1-WIN을 사용하였다(정, 2004). 모의구간은 대청댐으로부터 금강하구둑까지 137 km이며 단면자료는 하천정비 기본계획의 횡단측량자료를 활용하였다(건설교통부, 2002). 부정류 해석을 위한 수리모들의 지배방정식은 St. Venant의 연속방정식(식 (1))과 운동량방정식(식 (2))으로 구성된다. 수리해석모들에서는 유량, 유속, 하천단면, 수위와 같은 하

천의 수리학적 변수들을 계산하고 그 결과를 저장하여 수질 해석모들의 입력 자료로 전달한다. 수리모들은 하천 경계를 따라 연속적으로 유입 (또는 유출)하는 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, S_f는 에너지경사, h는 수위이다.

물질의 이송과 확산 그리고, 수질반응은 식 (3)과 같이 물질수지식으로부터 유도된 지배방정식으로 표현된다. 이송항의 수치해석은 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 α는 오염물질의 농도, S*는 오염원의 발생 및 소멸항, D는 확산계수, γ = 측방향 유입수의 농도이다.

수질해석모들은 수온, 탄소계BOD(CBOD), 유기질소(Org-N), 암모니아성질소(NH₃-N), 질산성질소(NO₃-N), 용존산소(DO), 유기 인(Org-N), 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, 장대 하천의 정체수역에서 종종 발생하는 조류에 의한 CBOD의 내생부하가 수질반응 기작에 포함되어 있다. Fig. 4는 수질 모델에 포함된 질소의 성분과 상호 반응기작을 보여주고 있으며, 본 연구에서는 단기간의 플러싱 방류효과 분석이 목적이므로 부착식물과 조류의 영향은 고려하지 않았다.

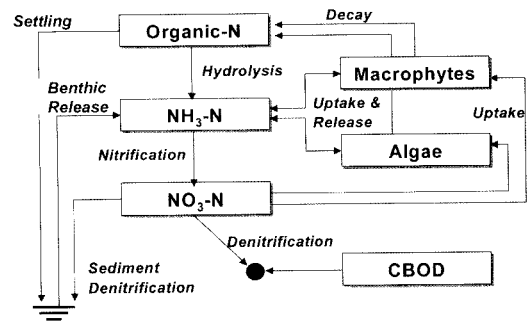


Fig. 4. Forms of simulated nitrogens and their interactions in the model.

질소농도의 모의결과에 영향을 미치는 매개변수인 AKN 과 ADN은 2002년 9월에 실측한 유량과 수질자료를 이용하여 보정하였다. 보정방법은 정상상태의 경계조건에서 실측값과 모의값의 평균제곱오차의 평방근(root mean square error, RMSE)이 최소가 될 때까지 시행착오법으로 보정하였으며 최종적으로 결정된 매개변수 값은 Table 1과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2} \quad (4)$$

여기서 y_i = 실측값, \bar{y}_i = 모의값, N = 자료수를 나타낸다.

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

Parameter	Description	Unit	Default	Calibrated
AKN	Nitrification rate	1/day	0.3	0.1
ADN	Denitrification rate	1/day	0.1	0.1

3. 결과 및 고찰

3.1. 도달시간 및 수질개선효과 분석

Fig. 5는 주요지점의 수위와 댐 방류량 도달시간에 대한 모의결과를 실측자료와 비교한 것이다. 금남지점은 실험기간 동안 수위계가 작동하지 않아 자료가 결측되어 비교를 할 수 없었다. 대청 조정지점에서 방류량은 11월 22일 오전 9시에 최대 227 m³/sec였으며, 실측한 첨두유량이 하류 매포지점과 공주지점에 도달한 시간은 각각 오전 11시(도달시간 2시간)와 오후 9시(도달시간 12시간)로 나타났으며 모형의 수리해석결과와 매우 잘 일치하고 있다. 그러나 계산수위는 실측수위보다 대체로 0.2~0.3 m 높게 나타났으며, 이러한 오차의 원인은 댐 방류시기가 갈수기이므로 하류로 전파되는 과정에서 유량의 하도손실이 크게 일어났기 때문으로 판단된다.

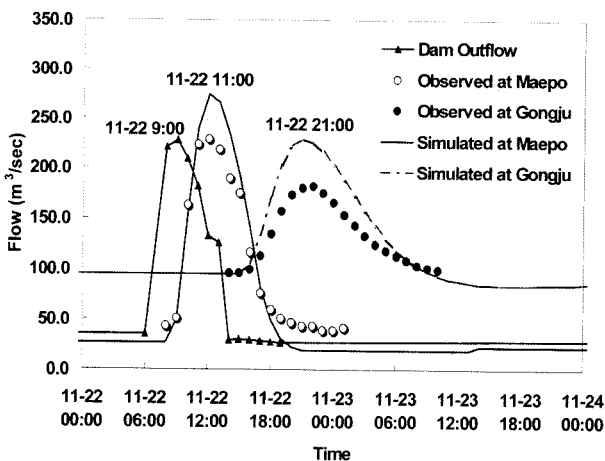


Fig. 5. Observed and simulated hydrographs and travel times at control points.

실측 수위곡선은 하류로 진행 할수록 하강부에 긴 꼬리를 형성하는 왜곡현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 하천의 하상에 존재하는 소(pool)와 양안에 존재하는 흐름지체 구간(dead zone)의 영향으로써 오염물질의 확산에도 중요한 영향을 미치는 요소이다. 갈수기 동안 상류 댐의 플러싱 방류에 따른 하류 하천의 수리현상과 유량의 도달시간은 수질사고 대응에 매우 중요한 정보이다. 그러나 지금까지 현실적인 어려움으로 실험적인 연구가 이루어지지 않았으며, 본 실험 결과는 댐 운영자에게 매우 유용한 정보를 제공한다. 또한 KORIV1-WIN 모형의 수리모듈은 댐 방류량의 도달시간과 하천 수위 상승효과를 검토하는데 매우 유용하게 활용가능하다고 판단된다.

저수지의 단기 플러싱 방류가 하류 질소농도에 미치는 영향은 측정위치와 항복에 따라 편차가 있는 것으로 나타났다(Fig. 6). 매포와 금남지점에서는 댐 방류량이 통과하는

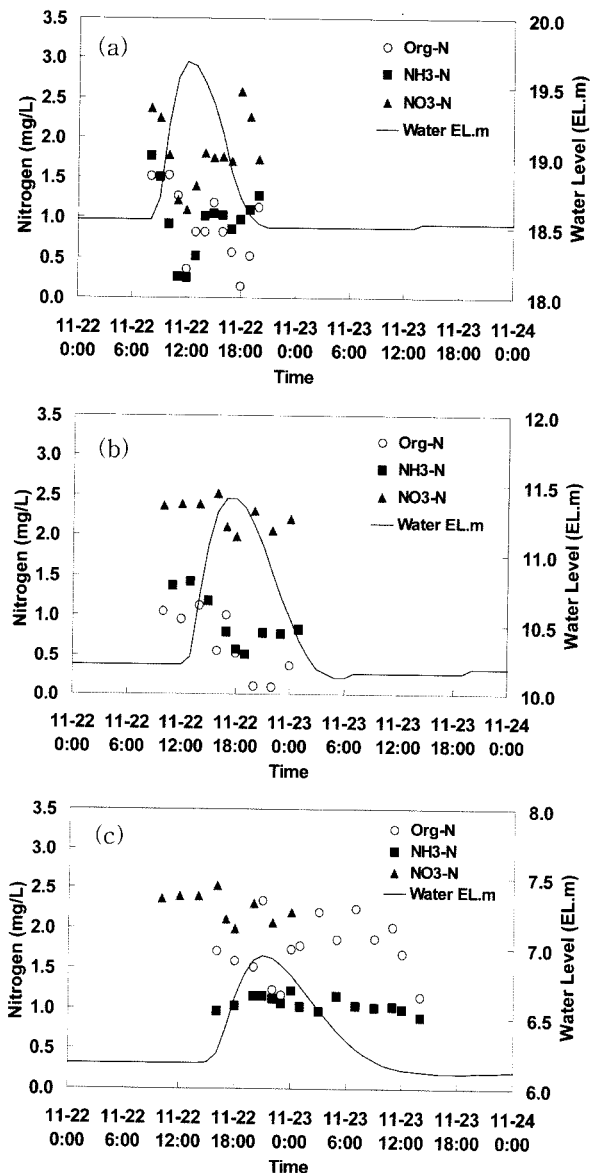


Fig. 6. Observed nitrogen concentrations during flushing experiment at (a) Maepo, (b) Geumnam, and (c) Gongju.

동안 질소농도가 급격히 감소하였으나, 공주지점에서는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 매포지점에서 NH₃-N 농도는 댐 방류량이 도달하기 전에 1.8 mg/L에서 침두유량이 통과할 때 0.2 mg/L까지 떨어진 후 방류량이 통과한 후에는 다시 1.2 mg/L로 상승하였다. 플러싱에 의한 NO₃-N 농도의 저감효과도 NH₃-N과 유사한 경향을 보였으며, 침두유량이 통과할 때 2.5 mg/L에서 1.0 mg/L까지 떨어진 후 플러싱 유량이 통과한 후에는 초기농도 상태로 상승하였다. 반면에 Org-N은 수질개선 경향은 보였지만 대체로 농도의 변화 폭이 크게 나타났다. 이것은 플러싱 유량의 선단이 지나면서 하천 바닥의 저니층이 재부상 하였기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Barillier 등(1993)이 세느강에서 실험한 결과와 잘 일치하고 있다.

금남지점에서도 플러싱 방류에 따른 NH₃-N 농도의 저감 효과는 뚜렷이 나타났다. 댐 방류량이 도달하기 전에 1.5 mg/L에서 침두유량이 통과할 때 0.5 mg/L까지 하강하였다. 그러나 NO₃-N 농도의 저감 효과는 상대적으로 낮았으며 도달 전 2.5 mg/L에서 침두유량이 통과할 때 2.0 mg/L까지 떨어진 후 다시 상승하는 경향을 보였다. 금남지점에서 Org-N은 뚜렷한 수질개선 경향을 나타내었으며, 방류전 1.2 mg/L에서 0.2 mg/L까지 저하하였다.

그러나 공주지점에서는 모든 질소 항목의 수질농도가 플러싱 방류에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이것은 저수지에서 방류된 플러싱 유량이 공주지점까지 도달하는 12시간 동안 흐름방향 확산(Dispersion)에 의해 하천수와 혼합이 충분히 일어난 때문인 것으로 유추된다. 플러싱 방류량과 시간을 증가시켜주면 하천의 흐름 특성이 이송

(Advection)현상에 지배되어 수질개선 효과가 좀 더 하류까지 유지 될 것으로 사료된다.

3.2. 수질예측 모형 적용

플러싱 방류 후 각 관측지점에서 질소의 성분별로 측정된 실측값을 모의값과 비교한 결과는 Figs. 7~9에 제시되었다. 모형은 매포지점에서 용존성 질소인 NH₃-N과 NO₃-N에 대해서 플러싱 방류의 도달에 따른 농도저감 효과를 비교적 잘 예측하였으며 총질소인 T-N의 농도 저감효과도 비교적 잘 반영 하였다. 그러나 Org-N의 경우, 방류수의 농도가 갑천의 농도보다 높아 플러싱 방류로 인한 희석효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 모의값은 실측값의 경향과도 큰 차이를 보였다. 일반적으로 하천에서 Org-N은 크기에 따라 용존형(Dissolved form)과 입자형(Particulate form)의 형태로 존재하며 외부오염원과 수체내 조류 또는 수생식물의 분해가 농도 증가 요인으로 작용하는 반면, 입자형 물질의 침강과 가수분해로 의한 NH₃-N으로의 변형이 감소 요인으로 작용한다. 그러나 모델에서는 입자형과 용존형 유기질소를 구분하지 않고 모의를 하며 하천 바닥 저니층의 재부상 효과도 고려하지 않아 실측값의 변동을 잘 반영하지 못하는 것으로 판단된다.

금남지점에서도 모의결과는 매포지점과 유사한 경향을 나타내었으며 플러싱 방류가 도달함에 따라 NH₃-N, NO₃-N, 그리고 T-N의 농도저감 효과를 비교적 잘 예측하였다(Fig. 8). 그러나 역시 Org-N의 모의결과는 실측값의 경향과 차이를 보였다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 공주지점에서 모의결과는 모

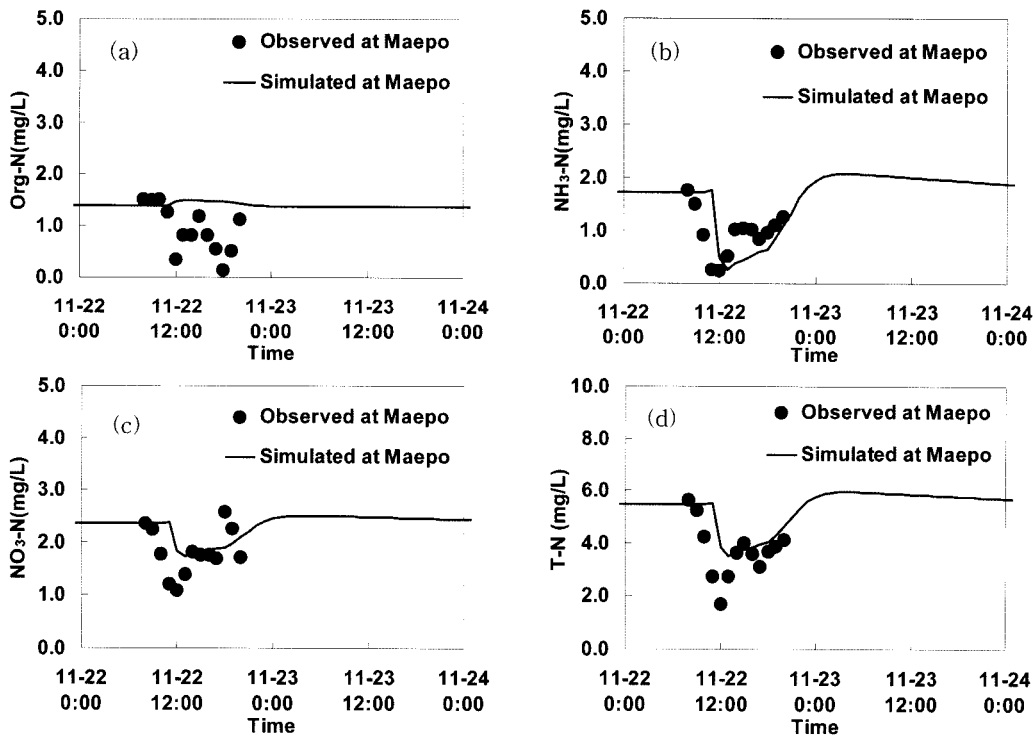


Fig. 7. Comparisons between observed and simulated (a) Org-N, (b) NH₃-N, (c) NO₃-N and (d) T-N concentrations at Maepo.

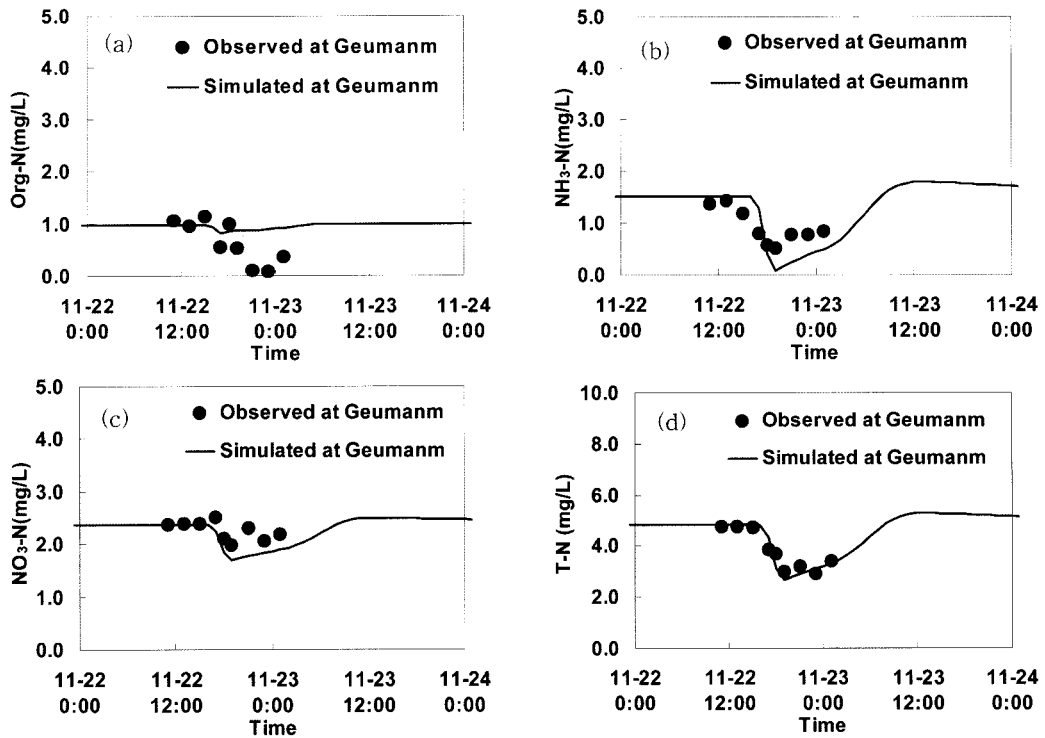


Fig. 8. Comparisons between observed and simulated (a) Org-N, (b) NH₃-N, (c) NO₃-N and (d) T-N concentrations at Geumann.

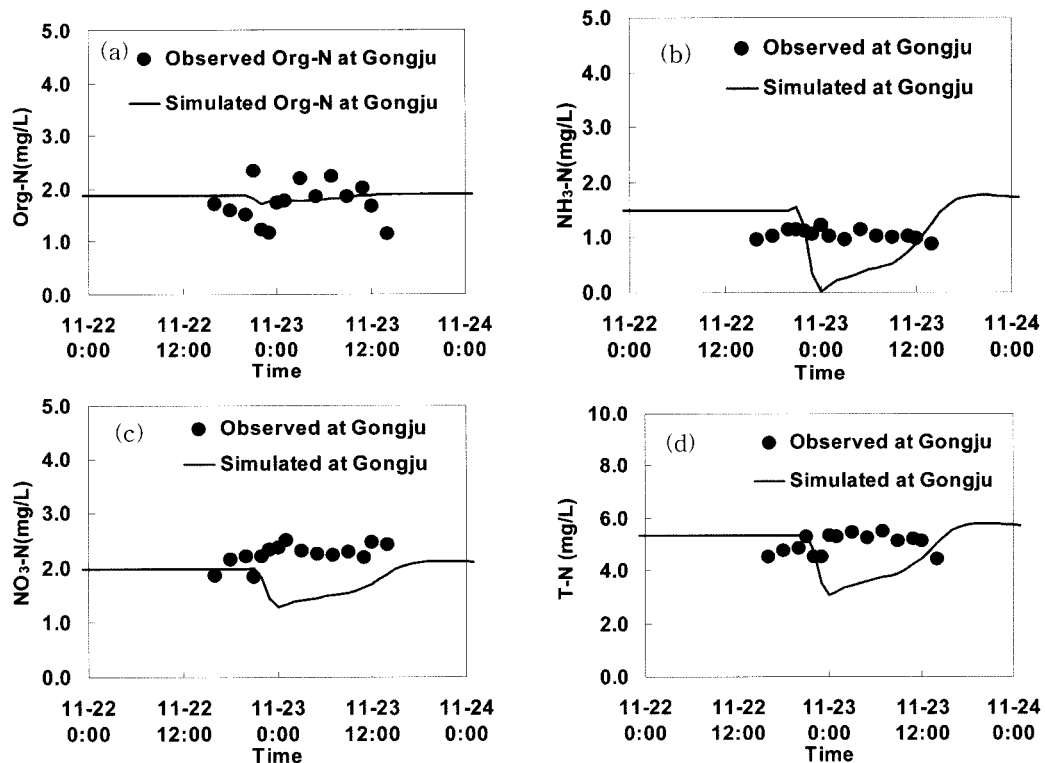


Fig. 9. Comparisons between observed and simulated (a) Org-N, (b) NH₃-N, (c) NO₃-N and (d) T-N concentrations at Gongju.

든 질소 항목에 대하여 플러싱 방류에 따른 실제 농도 변동 경향을 제대로 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 모형은 플러싱 방류에 따른 질소농도 저감효과가 매포와 금남

지점에서와 같이 공주지점까지 계속 유지되는 것으로 모의 하였으나, 실측결과는 대체로 NH₃-N과 NO₃-N의 농도값이 플러싱 방류에 민감하지 않은 것으로 나타났다. 이러한 오

차는 대상 하천구간 내에 산재해 있는 보의 영향 때문에 발생할 수 있는 추가적인 혼합효과가 모형에서 고려되지 않은 때문으로 판단된다. 정확한 원인분석을 위해서는 보와 같은 하천 수리구조물의 효과를 포함한 보다 정밀한 플러싱 방류 실험과 모델링이 필요하다.

3.3. 댐 방류 대안별 질소농도 변화 분석

2002년 3월 갈수기 동안 다양한 댐 플러싱 방류 시나리오가 하루 하천의 NH₃-N 농도의 저감에 미치는 영향을 분석하기 위해 모형을 적용하였다. Fig. 10은 방류 시나리오에 고려된 4가지 경우를 보여주고 있으며 case1은 2002년 3월의 실제 월평균 방류량인 12 m³/sec가 공급될 경우를 나타낸다. 그리고 나머지 cases는 모두 플러싱 방류 총량 12백만m³을 48시간 지속 공급하는 경우(case 2), 12시간 간격으로 간헐적으로 공급하는 경우(case 3), 96시간 균등 공급하는 경우(case 4)에 해당한다.

각각의 플러싱 방류 시나리오에 대한 하루 하천 부여지점에서의 NH₃-N 농도 변화 모의 결과는 Fig. 11과 같다. 댐의 플러싱 방류가 없을 경우(case1) NH₃-N은 3.8 mg/L까지 상승하는 것을 보여주며, case2의 경우 68시간 정도 2.7 mg/L로 농도가 낮아졌다 다시 상승하는 것으로 나타났다. case3의 경우 106시간 동안 3.0 mg/L까지 농도를 낮출 수 있는 것으로 모의되었다. case4와 같이 간헐적으로 방류량을 변화시키는 경우 농도변화는 sin함수 형태로 증감하고 있는 것을 볼 수 있으며 농도 변화폭은 case1과 case2의 범위에 놓였다.

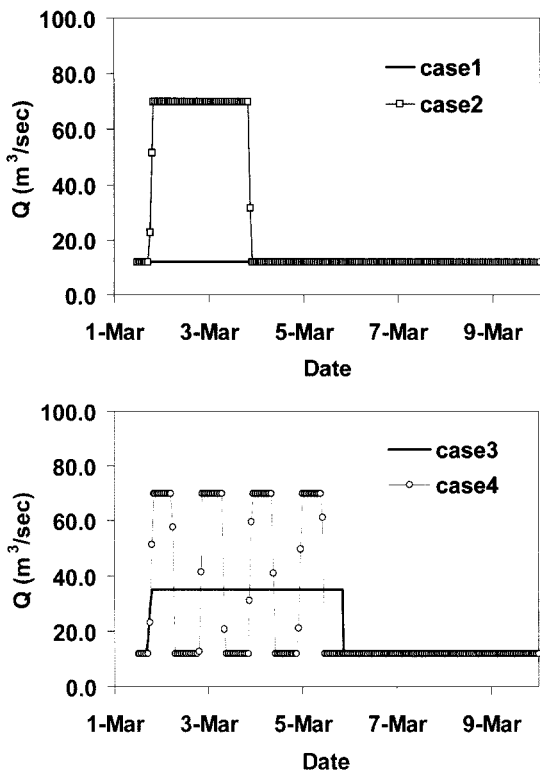


Fig. 10. Alternative dam flushing flow cases to assess their effect on NH₃-N concentrations.

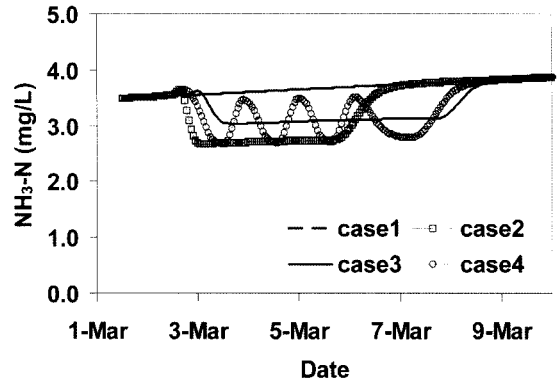


Fig. 11. NH₃-N variations in response to alternative flushing flow cases.

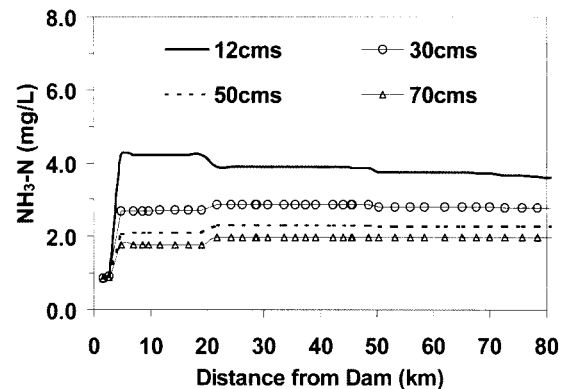


Fig. 12. Downstream NH₃-N variations for different dam outflows under steady-state conditions on March, 2002.

모든 경우에서 NH₃-N 농도가 초기치보다 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 그 이유는 2002년 3월에 주요 오염하천인 갑천에서 유입하는 암모니아의 경계조건 농도가 8.08 mg/L로써 부여지점의 초기농도 3.50 mg/L 보다 훨씬 높기 때문이다. 즉, 부여지점의 초기농도가 새로운 경계조건에서 정상상태농도에 수렴하는데 시간이 소요되는 것으로 보인다. 플러싱 방류 후반부 농도분포 곡선은 초기에 비해 말단부에서 긴 꼬리를 나타내고 있다. 이러한 현상은 Fig. 5에서 나타난 수위곡선의 왜곡현상과 일치하고 있으며, 하천의 하상과 양안에 존재하는 흐름정체 구역 때문으로 해석될 수 있다(Nordin et al., 1980).

Fig. 12는 정상상태의 조건으로 상류댐의 방류량을 12, 30, 50, 70 m³/sec로 유지하였을 때 하천거리별 NH₃-N 농도 변화를 모의한 결과를 보여준다. 암모니아농도는 갑천이 유입한 직후 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하천의 NH₃-N 농도를 정수장 운영 실무자들이 요구하는 2.0 mg/L 이하로 유지하기 위해서는 댐 방류량을 50 m³/sec 이상 공급해야 하는 것으로 나타났다.

4. 결론

대청댐 저수지의 플러싱 방류가 겨울철 하루 하천에서 주기적으로 높게 발생하는 암모니아성질소 농도의 저감에

미치는 영향을 분석하기 위해 2003년 갈수기 동안 현장실험을 실시하고 비정상상태 하천수질모형(KORIV1)을 적용하여 다양한 댐 방류시나리오가 하천의 암모니아성질소 농도 저감에 미치는 효과를 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결론은 아래와 같다.

- 1) 단기 플러싱 방류가 하류 하천의 용존성 질소인 $\text{NH}_3\text{-N}$ 과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도저감에 미치는 효과는 매우 큰 것으로 나타났다.
- 2) 그러나 수질개선 효과는 플러싱 공급수량과 지속시간에 제한을 받았으며 매포와 금남지점까지는 효과가 뚜렷하게 나타난 반면 공주지점에서는 나타나지 않았다.
- 3) KORIV1-WIN 모형은 댐 방류량이 하류 주요지점에 도달하는 시간과 매포와 금남지점에서의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도변화를 비교적 잘 모사하였지만, 공주지점에서는 큰 편차를 보였다.
- 4) 모형의 성능을 개선하기 위해서는 플러싱 방류 선단이 지나면서 발생하는 하천 저니층 오염물질의 재부상과 보에 의한 혼합 영향 등을 고려하는 것이 필요하다.
- 5) 2002년 3월 갈수기를 대상으로 다양한 플러싱 방류 시나리오가 하천의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도 저감에 미치는 영향을 분석한 결과, 모형은 비교적 안정적으로 암모니아농도의 동적 변화 특성을 모사하는 것으로 평가되었다.
- 6) 댐 운영자는 목표로 하는 암모니아 농도를 달성하기 위한 플러싱 방류량과 공급방법을 검토하는데 KORIV1 모형을 효과적으로 사용 할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 건설교통부, 금강수계 하천정비기본계획, pp. 7-19 (2002).
- 정세웅, 김주환, 갈수기 저수지운동을 위한 댐 하류 수질예측 모형, *한국수자원학회 학술발표회 논문집(I)*, pp. 632-637 (2001).
- 정세웅, 일별 암모니아성 질소($\text{NH}_3\text{-N}$)농도 예측을 위한 다중회귀모형 개발, *한국수자원학회논문집*, **36(6)**, pp. 1047-1058 (2003a).
- 정세웅, 강병수, 조주영, 일별 암모니아성 질소농도 예측을 위한 다중회귀모형 개발, *대한환경공학회 추계학술연구발표회논문집*, pp. 136-143 (2003b).
- 정세웅, 고익환, 수량·수질 통합 하천운영 지원을 위한 하천수질모형 구축, *한국수자원학회 학술발표회논문집(I)*, pp. 373-376 (2003c).
- 정세웅, 고익환, 김남일, 1차원 비정상상태 하천수질모의를 위한 KORIV1-WIN 개발, *한국수자원학회 학술발표회 논문집*, p. 108 (2004).
- 한건연, 김광섭, 박재홍, 하천으로 유입된 오염물의 유동해석을 위한 동력학적 모형의 개발, *한국수문학회지*, **27(4)**, pp. 145-154 (1994).
- 한건연, 김광섭, 낙동강 유역에서의 독성오염물 배출에 따른 수질해석 모형의 개발, *한국수자원학회지*, **28(1)**, pp. 57-69 (1995).
- 한국수자원공사, *대하천에서의 오염물질 이송확산과 저감대책에 관한 연구*, pp. 12-178 (1996).
- 한국수자원공사, *대청댐 하류 오염물질 이송확산예측 및 저감대책에 관한 연구*, pp. 15-134 (1999).
- 한국수자원공사, *갈수기 하류하천 수질보전을 고려한 전략적 대청댐 운영기법 연구*, pp. 9-10 (2000).
- APHA, AWWA and WEF., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Eds., APHA, Washington D.C., USA, pp. 4-103~4-126 (1998).
- Barillier, A., Garnier, J. and Coste, M., Experimental Reservoir Water Release Impact on the Water Quality on a River 60 km Downstream (upper seine river, France), *Wat. Res.*, **27(4)**, pp. 635-643 (1993).
- Chapman, D., *Water Quality Assessments. A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*, Chapman & Hall (1992).
- Cho, J.-H., The Impact of Hydroelectric Power Plant Discharge on the Water Quality of the Namde River, *Environ. Eng. Res.*, **6(3)**, pp. 123-130 (2001).
- Chung, Se Woong and Kim, Ju Hwan, Development of Artificial Neural Network Models Supporting Reservoir Operation for the Control of Downstream Water Quality, *Water Engineering Research, Korea Water Resources Association*, **3(2)**, pp. 143-153 (2002).
- Chung, Se Woong and Kim, Ju Hwan, Development of Water Quality Models for Supporting $\text{NH}_3\text{-N}$ Control in a Dam Regulated River, *in the Proceeding of 4th IWA World Water Congress and Exhibition*, **19-24**, September, 2004, Marrakech, Morocco, p. 223 (2004).
- Environmental Laboratory, CE-QUAL-RIV1: A Dynamic, One-Dimensional(Longitudinal) Water Quality Model for Streams User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Waterway Experiment Station, MS, USA (1995).
- Martin, J. L. and Wool, T., A Dynamic One-Dimensional Model of Hydrodynamics and Water Quality EPD-RIV1 User's Manual (2002).
- Nordin, C. F. and Troutman, B. M., Longitudinal Dispersion in Rivers: The Persistence of Skewness in Observed Data, *Water Resources Research*, **16**, pp. 123-128 (1980).
- Tanaka, N., Osugi, T., Nanami, Y. and Okano, M., Methods of Environmental Restoration for Downstream of Dams, In Proceedings for Symposium on Environmental Considerations for Sustainable Dam Projects, ICOLD 72nd Annual Meeting, Seoul, Korea. p. 45 (2004).