

일별 암모니아성 질소(NH₃-N)농도 예측을 위한 다중회귀모형 개발

Development of Multiple Regression Models for the Prediction of Daily Ammonia Nitrogen Concentrations

정 세 웅*

Chung, Se-Woong

Abstract

Seasonal occurrence of high ammonia nitrogen(NH₃-N) concentrations has hampered chemical treatment processes of a water plant that intakes water at Buyeo site of Geum river. Thus it is often needed to quantify the effect of Daecheong Dam outflow on the mitigation of NH₃-N contamination. In this study, multiple regression models were developed for forecasting daily NH₃-N concentrations using 8 years of water quality and dam outflow data, and verified with another 2 years of data set. During model development, the coefficients of determination(R²) and model efficiency(E_m) were greater than 0.95. The verification results were also satisfactory although those statistical indices were slightly reduced to 0.84~0.94 and 0.77~0.93, respectively. The validated model was applied to assess the effect of different amounts of dam outflow on the reduction of NH₃-N concentrations in 2002. The NH₃-N concentrations dropped by 0.332~0.583 mg/L on average during January~March as outflow increases from 5 to 50cms, and was most significant on February. The results of this research show that the multiple regression approach has potential for efficient cause and effect analysis between dam outflow and downstream water quality.

Keyword : Multiple Regression Model, NH₃-N, Water Quality Modeling, Dam Outflow

요 지

겨울철에 금강하류에서는 암모니아성 질소(NH₃-N) 농도가 주기적으로 높게 검출되어, 부여지점에서 취수하는 정수장의 수처리 공정에 큰 장애가 되고 있다. 질소농도 저하와 소독부산물 생성 억제를 위해 종종 대청댐의 추가 방류가 검토되고 있으나, 방류량과 질소농도 관계의 정량적 분석에 어려움이 있었다. 본 연구에서는 8년간의 일별 수질자료와 댐 방류량 자료를 이용하여 겨울철(12월~3월) 동안 일별 NH₃-N 농도를 예측할 수 있는 다중회귀모형을 개발하고, 최근 2년간의 자료를 이용하여 모형을 검증하였다. 모형 개발과정에서 모의값은 실측값과의 결정계수와 모형효율이 모두 0.95 이상으로 높게 나타났다. 검증과정에서는 각각 0.84~0.94와 0.77~0.93으로써 신뢰도

* 충북대학교 환경공학과 조교수, 충북 청주시 흥덕구 개신동 산 48
Assistant Professor, Dept. of Environmental Engineering, Chungbuk National University
(E-mail : chung@chungbuk.ac.kr)

가 약간 떨어졌지만, 방류량과 하류의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도 관계를 분석하는데 충분히 활용가능 한 것으로 평가되었다. 모형은 갈수기 동안 댐 방류량이 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도 저감에 미친 효과를 분석하는데 사용되었다. 1~3월 동안 방류량을 5에서 50cms까지 증가시켜 가며 모의한 결과, $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도는 평균 0.332~0.583 mg/L 감소하였으며 2월에 가장 큰 저감효과가 나타났다. 개발된 다중회귀 수질모의기법은 충분한 실측자료가 확보된 경우에 수치모형이 요구하는 광범위한 경계조건 자료 없이도 댐 방류량과 하천수질의 인과관계를 분석하는데 유용하게 활용가능 할 것으로 기대된다

핵심용어 : 다중회귀분석모형, 암모니아성 질소, 수질 모델링, 댐 방류량

1. 서론

갈수기 동안 댐 하류 조절하천의 유량은 대부분 지류의 자연유량 감소로 인해 상류 댐 방류량에 의존하는 비율이 매우 높다. 따라서, 이 기간 동안 하천의 수질은 댐 방류량에 상당한 영향을 받게되므로 수질을 보전하기 위해서는 적절한 유지유량을 공급할 필요가 있다. 그러나, 과거에 건설된 댐들은 수질보전을 고려한 하천유지유량이 사업목적에 반영되지 않은 경우가 있어, 해마다 갈수기가 되면 댐 운영자와 하류 지자체 용수 이용자간에 수량과 수질을 둘러싼 갈등과 분쟁이 찾아지고 있다. 더구나 최근, 낙동강 하류에서 취수하는 부산·경남 지역주민들이 원수 수질 악화를 이유로 수질에 따른 물 값의 차등적용을 주장하고 나서는 등 상수 원수의 수질을 둘러싼 하천상·하류간의 갈등과 논쟁은 더욱 더 증가 할 전망이다.

하류 수질을 고려하여 저수지를 운영하기 위해서는 댐 방류량과 하천수질의 정량적인 관계를 분석할 수 있는 수질모형이 필요하다. 즉, 댐 방류량과 하천수질은 비선형적인 관계를 가지며 수문상황과 하천의 계절적 자정능력, 그리고 수질 항목에 따라 다르게 나타나므로 추가적인 용수공급에 따른 수질개선 효과를 고려하기 위해서는 수질모형을 통한 효과분석이 불가피하다. 계획측면의 모형과는 달리, 저수지운영을 위한 수질모형은 가급적 제한된 입력자료를 가지고도 신속하게 모의가 가능하여야 하며, 공급 가능한 수자원의 한계를 고려할 때 예측의 신뢰도도 충분히 보장되어야 한다.

최근들어, 수치해석적 수질모형이 요구하는 방대한 경계조건 및 초기조건 입력자료의 제약사항을 극복하고자 회귀분석, 시계열분석, 신경망이론 등을 이용한 하천수질모형 개발이 계속적으로 이루어지고 있다(강두선 등, 1998; 류병로와 한양수, 1998; 조정석 등,

1999; 한양수, 1999; 안상진 등, 2000; 정세웅과 김주환, 2001; Chung과 Kim, 2002). 그러나, 이러한 통계형 수질예측모형들은 아직 하천운영과 저수지운영을 지원하기 위한 실용화단계에는 이르지 못하고 있는 실정이어서 보다 많은 실측자료를 이용한 모형의 개발과 검증작업이 필요하다. 이중 회귀분석기법은 자연현상의 입력과 출력문제의 함수적 묘사(functional mapping)를 위해 가장 일반적으로 사용되어 온 기법이다(Alley, 1986; Irish 등, 1998; Haggard 등, 2003). 이 방법은 종속변수와 독립변수간에 특정한 함수적 관계, 즉 선형함수, 멱함수, 또는 지수함수적 관계가 존재한다는 가정에 근거하고 있다. 다중회귀모형(Multiple Regression Model)은 기왕의 방대한 운영 자료로부터 유도되는 통계형 모형으로서, 일단 구축되면 수치해석적 모형이 요구하는 상하류 경계조건의 많은 입력자료를 요구하지 않기 때문에 제한된 입력 자료로 신속하게 하천수질을 모의할 수 있다는 장점이 있다. 그리고, 이 방법은 해석이론이 일반화되어 있기 때문에 하천 또는 저수지 운영자들이 쉽게 이해하고 적용할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구의 목적은 금강의 부여지점 암모니아성 질소($\text{NH}_3\text{-N}$) 농도와 대청댐 방류량과의 관계를 예측할 수 있는 다중회귀모형을 개발하고, 댐 방류량이 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도 저감에 미치는 영향을 평가하는 데 있다. 연구의 대상지역인 금강하류에서는 겨울철에 수온의 저하와 함께 질산화 박테리아의 활동이 위축되어 주기적으로 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 음용수 수질기준(0.5 mg/L) 보다 훨씬 높게 검출되고 있다. 따라서 이를 원수로 취수하는 정수장의 정수처리 공정에 많은 장애를 초래하고 있으며, 종종 질소농도의 저감을 위해 대청댐의 추가방류가 실시되기도 하였다. 본 연구에서는 1993~2000년까지 8년 동안 일별로 실측한 수온, pH, 알칼리도, $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도와 대청댐 방류량 자료를 이용하여 겨울철(12월~3월) 동안 부여지점의 일별

$\text{NH}_3\text{-N}$ 농도를 예측할 수 있는 다중회귀모형의 최적 매개변수를 산정하였으며, 2001~2002년 자료를 이용하여 모형을 검증하였다. 개발된 모형은 2002년 갈수기 동안 대청댐의 방류량을 5cms에서 50cms로 변화시켜가며 방류량 증가가 부여지점에서의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도 저감에 미치는 효과를 분석하는데 적용되었다.

2. 연구 방법

2.1. 연구 대상지역 및 수질문제

본 연구의 대상지역은 금강수계에 위치한 대청댐과 댐으로부터 약 76 km 하류에 위치한 부여 지점으로서 한국수자원공사가 운영하고 있는 부여 석성정수장의 원수를 취수하는 곳이다(Fig. 1). 지난 10년간 일별로 측정된 원수의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도를 살펴보면, 겨울철 동안 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도는 음용수 수질기준인 0.5 mg/L 보다 훨씬 높게 검출되었으며 이것은 정수장의 화학적 정수처리 공정에 많은 어려움을 주고 있다(Fig. 2). 특히, 지난 1995~1996년에는 2년 연속으로 1월에서 3월 사이에 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 음용수 수질기준의 6배에 해당하는 3.0 mg/L 보다 높게 나타났으며, 최근 2002년에도 비슷한 현상이 나타났다. 이 기간 동안 정수장에서는 질소를 처리하기 위한 기술적인 어려움뿐만 아니라 염소투입량 증가, 트리할로메탄과 같은 소독

부산물 발생, 시설물 부식, pH 및 알칼리도 저하에 따른 보조약품 추가투입, 잉여슬러지 발생 등 막대한 사회적·경제적 손실을 초래했다(한국수자원공사, 2000).

계절적으로 하천에서 암모니아성 질소의 농도는 온도가 낮고 *Nitrosomonas* 또는 *Nitrobacter*와 같은 질산화 박테리아의 활동이 활발하지 않은 겨울철에 높게 나타나고, 반면에 유량이 풍부하고 온도가 높은 하절기에는 질산화 작용 때문에 낮게 검출되는 경향이 있다(Chapman, 1992). 높은 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도는 특정 수소 이온농도(pH) 상태에서 생물체에 독성이다. 보통 물 속에 존재하는 암모니아는 이온화되지 않은 형태의 암모니아(NH_3)와 이온화된 암모니아, 즉 암모늄 이온(NH_4^+)이 평형을 이루고 있다. 총 암모니아 농도는 이 두가지 형태의 농도 값을 합한 값이다. 암모니아는 또한 여러 가지 금속이온과 결합된 형태로 존재하기도 하고 콜로이드성입자, 부유물질, 그리고 하천 바다 퇴사에 흡착되기도 한다. 본 연구의 대상지점인 부여지점에서 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 갈수기 동안 높게 나타나는 주요 원인은 대전권에서 유입하는 갑천과 청주권에서 유입하는 미호천의 생활하수 때문인 것으로 분석되고 있다(한국수자원공사, 1993, 1999).

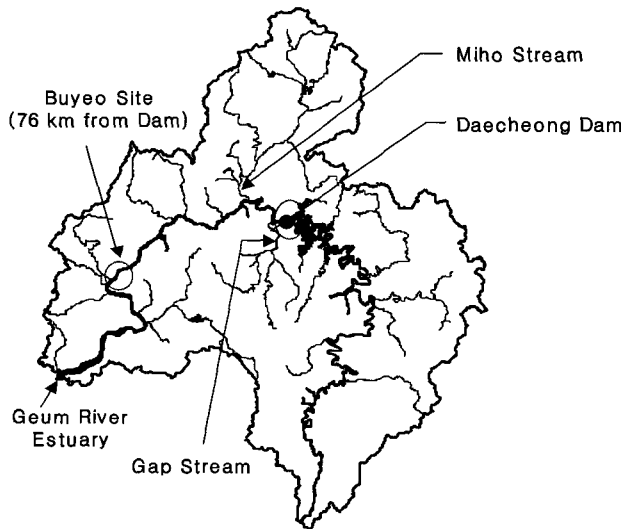


Fig. 1. Layout of Geum river basin and study site locations

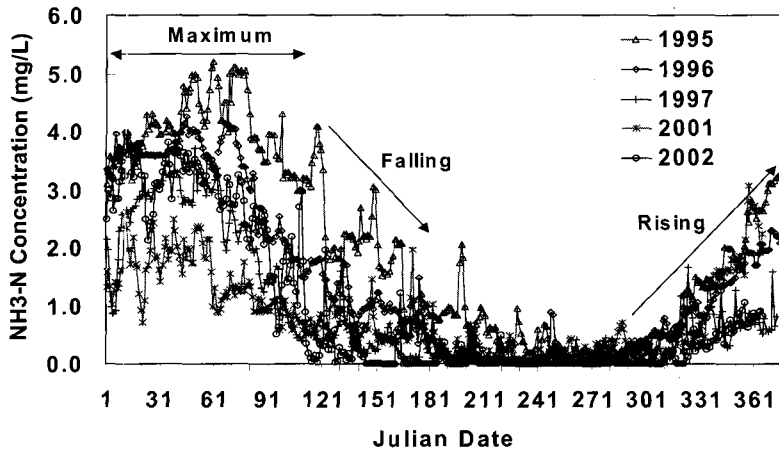


Fig. 2. Observed daily $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations at Buyeo site of Geum river basin

2.2. 다중회귀모형의 구성

다중회귀모형은 2개 이상의 독립변수를 사용하여 종속변수 y 를 산정하는 방법으로 선형다중회귀모형과 지수형 다중회귀모형 등 여러 가지 형태의 관계가 가능하다. 본 연구에서는 선형, 멱함수, 지수형 모형을 모두 검토하였으나, 선형 다중회귀모형은 음의 농도 값을 발생시키는 단점이 있어 아래 식(1)과 같이 멱함수 모형을 채택하였다.

$$y = \beta_0 \cdot x_1^{\beta_1} \cdot x_2^{\beta_2} \cdot \dots \cdot x_n^{\beta_n} + \varepsilon \quad (1)$$

여기서 ε 은 잔차이며 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ 은 회귀분석을 통해 산정되는 최적 매개변수로서 각 독립변수 x_1, x_2, \dots, x_n 들이 종속변수 y 에 미치는 영향을 나타낸다.

모형의 독립변수는 댐 방류량, 전일 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도와와의 자기상관성, 그리고 정수장 원수 수질측정 인자들과의

상관분석을 통해 상관계수가 높은 항목을 포함시켰으며, 각 독립변수들과 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도(C_{t+1})간의 상관계수는 Table 1에 제시되었다. 식(1)을 암모니아성 질소농도에 영향을 미치는 인자들인 수온(T_t), 수소이온 농도(pH_t), 알칼리도(ALK_t), 전일의 댐 방류량(Q_t), 전일의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도(C_t), 예측 당일의 댐 방류량(Q_{t+1})으로 다시 표현하고 모든 변수에 상용로그를 취하면 식 (2)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \log(C_{t+1}) = & \log(\beta_0) + \beta_1 \cdot \log(T_t) \\ & + \beta_2 \cdot \log(\text{pH}_t) + \beta_3 \cdot \log(\text{ALK}_t) \\ & + \beta_4 \cdot \log(Q_t) + \beta_5 \cdot \log(C_t) + \beta_6 \cdot \log(Q_{t+1}) + \varepsilon_t \end{aligned} \quad (2)$$

절대값이 다른 각 영향인자들의 객관적인 영향 정도를 파악하기 위하여 입력자료들을 표준화하였으며, 표준화된 다중회귀분석을 수행하기 위한 관계식은 식 (3)과 같이 표현된다.

Table 1. Correlation coefficients between the $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration(C_{t+1}) and considered input variables (Data 1993~2002).

Variable Month	Tt	pHt	ALKt	Qt	Ct
December	-0.63	0.18	0.58	-0.60	0.97
January	-0.41	0.07	0.72	-0.55	0.98
February	-0.34	0.11	0.83	-0.65	0.98
March	-0.32	0.17	0.79	-0.60	0.98

$$Z = a_0 + a_1 Z_{T_i} + a_2 Z_{pH_i} + a_3 Z_{ALK_i} + a_4 Z_{Q_i} + a_5 Z_{C_i} + a_6 Z_{Q_{i+1}} + \varepsilon \quad (3)$$

여기서 $Z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$ 로서 각 종속변수와 독립변수들에 대하여 평균(\bar{x})과 표준편차(σ)로 표준화된 변량들이고, a_0, a_1, \dots, a_6 은 표준화된 다중회귀모형의 부분회귀계수이다. 최적매개변수의 산정은 식 (4)와 같이 실측값과 모의값의 잔차의 제곱합을 최소화하기 위하여 식(2)와 (3)에 대해 각 미지 계수들에 대한 편미분식들이 0으로 될 때의 값으로 결정하였으며, 선형연립방정식 해법인 LU분해법으로 계산하였다(Chapra and Canale, 2002).

$$\text{Min } S_r = \text{Min} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (4)$$

여기서 y_i 와 \bar{y}_i 는 각각 일별 암모니아질소 농도의 실측값과 모의값을 나타낸다.

모형개발에 사용된 수질자료들은 부여 석성정수장에서 먹는물 수질공정시험법에 따라 매일 측정된 값들이며, 일별 댐 방류량 자료는 대청댐의 조정지댐 방류량 자료로서 한국수자원공사 실시간물관리 데이터베이스에서 추출하여 사용하였다. 다중회귀모형은 하천의 수질에 영향을 미치는 유역으로부터의 오염부하량과 수문·기상학적 통계 특성이 정상상태(steady-state)로 유지된다는 가정을 전제로 하므로, 12월, 1월, 2월, 3월의 자료를 별도로 추출하여 모형을 월별로 각각 개발하였다. 즉, 동일 월에 대해서는 다중회귀모형에서 고려하는 독립변수 이외의 영향인자들이 동일한 상태로 유지되는 것으로 가정하였다. 그러므로, 통계형 모형의 한계

성 때문에 연차별로 증설된 환경기초시설의 영향은 모형에서 고려하지 못하였다.

2.3 모형의 평가방법

다중회귀모형의 모의결과를 평가하기 위하여 예측오차(forecast bias, B_f), 결정계수(coefficient of determination, R^2), 평균제곱오차의 평방근(root mean square error, RMSE), 모형의 효율(model efficiency, E_m), 실측값과 모의값 간의 선형회귀 계수(절편과 기울기)에 대한 신뢰구간, 그리고 시계열 및 잔차의 그래픽적 비교 방법을 사용하였다(Table 2). 예측오차 B_f 는 실측값과 모의값의 잔차를 산술평균한 값으로서 양의 값은 모형이 NH_3-N 농도의 실측값을 과소 평가하는 것을 의미하며 음의 값은 그 반대이다. 결정계수 R^2 는 실측값의 총 변동 중에서 모형으로 설명되는 비율을 나타내며, 0과 1사이 범위의 값을 가지며 값이 1에 가까울수록 모형의 정확도와 적합성이 양호한 것으로 평가한다. RMSE는 실측값과 모의값의 제곱오차로부터 평균 제곱오차를(root mean square errors) 구하여 제곱근을 구한 것으로 표준계산오차(standard error of estimates)가 된다. RMSE는 그 단위가 실제 변량의 단위와 같고 값이 작을수록 모형의 오차가 작은 것으로 평가된다. 모형의 효율 E_m 은 단순히 실측값의 평균값을 사용하여 예측하는 것에 비해 모형을 사용함으로써 얻어지는 예측의 효율성 정도를 나타내는 값으로서 0이하이면 실측값의 평균값을 사용하는 것보다 모형의 효율이 떨어지는 것을 의미하며, 1에 가까울수록 모형의 효율이 높은 것으로 평가된다. Table 2에서 y_i = 실측값, \bar{y}_i = 모의값, y_{ave} = 실측값 평균, N = 자료수를 나타낸다.

Table 2. Statistical analysis index for assessing model performance

Statistical Index	Equation	Desired value
Forecasting Bias	$B_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [y_i - \bar{y}_i]$	0
Coefficient of Determination	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{ave})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{ave})^2}$	1
Root mean square error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2}$	0
Model efficiency	$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{ave})^2 - \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{ave})^2}$	1

모의결과와 실측값의 도해적 비교 방법으로는 시계열 비교와 95%신뢰구간 및 예측구간을 갖는 1:1 선형비교 등을 사용하였다. 일별 모의값과 실측값 사이의 선형회귀분석을 통해 구한 절편과 기울기의 신뢰구간 폭이 작을 수록 실측값에 대한 모의값의 분산이 작은 것을 의미하며 모형의 성능이 보다 우수하다는 것을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모형의 최적매개변수 산정 결과

1993~2000년 동안 일별로 측정된 원수의 수질자료와 대청댐의 일별 하루 방류량 자료를 사용하여 산정한 12월, 1월, 2월, 3월에 대한 식(2)와 (3)의 다중회귀모형 최적 매개변수 값은 Table 3과 같다. 표준화된 모형의 매개변수 산정결과를 보면, 부여지점의 일별 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 전일의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도와 전일의 댐 방류량이며 월별로 약간의 차이는 있으나 수온과 알칼리도, 당일의 댐 방류량, 그리고 pH의 영향은 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 수온과 pH, 그리고 알칼리도의 영향이 작게 나타나는 이유는 다중회귀모형을 수문·기상조건이 비교적 동일한 조건으로 유지되도록 월별로 개발함으로써, 동일한 월에 대한 이들 변수의 변화가 매우 작기 때문인 것으로 판단된다. 그리고, 당일의 댐 방류량은 월별로 매개변수의 부호가 상이하게 나타나고 있으며, 그 영향도

매우 작은 것으로 나타났다. 그 이유는 유역의 수문상황에 따라 댐 방류량이 부여지점까지 도달하는 시간이 상이하며, 특히 가뭄이 심한 갈수기에는 하루 이상 소요되기 때문에 수질에 미치는 영향은 하루 지체되어 나타나는 것으로 보인다.

개발된 모형의 신뢰도를 평가하기 위하여 일별 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도의 모의값과 실측값 간의 1:1 선형회귀분석을 실시하였다(Fig. 3). Table 4에는 월별 선형회귀식의 절편과 기울기 그리고 이 값들에 대한 95% 신뢰구간과 함께 모형의 성능 평가를 위해 계산된 각종 통계분석 값들이 제시되었다. 12월~3월 모두 모의결과와 관측결과와 만족스런 선형관계를 보였으며, 결정계수값이 0.95이상으로 높게 나타나 개발된 다중회귀모형이 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도의 일별 변화를 매우 잘 반영하였다. 그러나, Fig. 3의 실측값과 모의값의 1:1 선형회귀분석에서 볼 수 있듯이 모형은 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 3.0 mg/L 보다 높은 경우에는 실측값을 다소 과소평가 하였다. 이러한 결과는 Table 4에 제시된 예측 오차값(B_1)에서도 동일하게 나타났으며, 다중회귀모형은 대체로 높은 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도 범위에서 0.014~0.022 mg/L 정도 실측값을 낮게 예측하는 경향이 있었다. 실측값과 모의값 간의 RMSE는 대체로 0.2 mg/L 내외의 값을 보였으며 모형의 효율도 0.95이상으로 비교적 높게 나타나, 일별 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도 예측을 위한 모형의 적용성이 매우 큰 것으로 평가되었다.

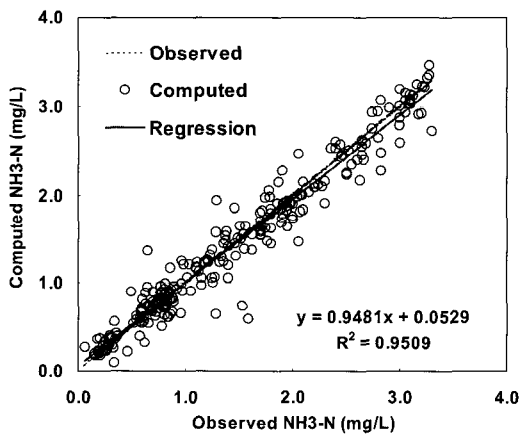
Table 3. Developed multiple regression model parameters using data from 1993 to 2000

Month	Number of Data	Type	Model Parameters						
			β_0/α_0	β_1/α_1	β_2/α_2	β_3/α_3	β_4/α_4	β_5/α_5	β_6/α_6
Dec.	248	Normal	-0.059818	-0.182657	0.195587	0.079983	-0.190204	0.845678	0.130996
		Stand-ardized	0.000023	-0.08028	0.004955	0.025407	-0.179112	0.850291	0.11928
Jan.	248	Normal	0.470215	-0.028091	-0.422319	0.000512	-0.068363	0.91028	0.020305
		Stand-ardized	0.000009	-0.018975	-0.009596	0.000319	-0.073532	0.924994	0.021544
Feb.	225	Normal	0.177498	-0.054889	-0.158728	0.091769	0.036233	0.833006	-0.112261
		Stand-ardized	0.000000	-0.021736	-0.003972	0.037607	-0.083658	0.865361	-0.001113
Mar.	248	Normal	0.099634	-0.141221	-0.11446	0.151831	-0.116399	0.82492	0.057308
		Stand-ardized	-0.000028	-0.074872	-0.008649	0.062755	-0.151739	0.825102	0.074326

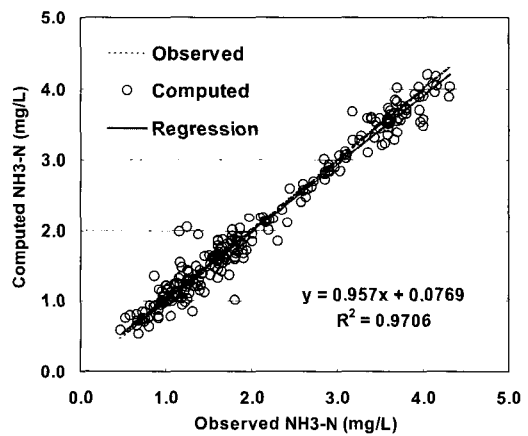
Table 4. Statistical analysis of the performance of multiple regression models

Month	Linear Regression Parameters				Bf (mg/L)	RMSE (mg/L)	R ²	Em
	ao	*U bound	a1	U bound				
		*L bound		L bound				
Dec.	0.0529	0.0058	0.9481	0.9203	0.022	0.198	0.95	0.95
		0.0999		0.9759				
Jan.	0.0769	0.0259	0.9570	0.9354	0.014	0.186	0.97	0.97
		0.1278		0.9785				
Feb.	0.0993	0.0333	0.9538	0.9292	0.013	0.215	0.97	0.97
		0.1654		0.9784				
Mar.	0.1136	0.0519	0.9407	0.9152	0.014	0.224	0.96	0.96
		0.1752		0.9663				

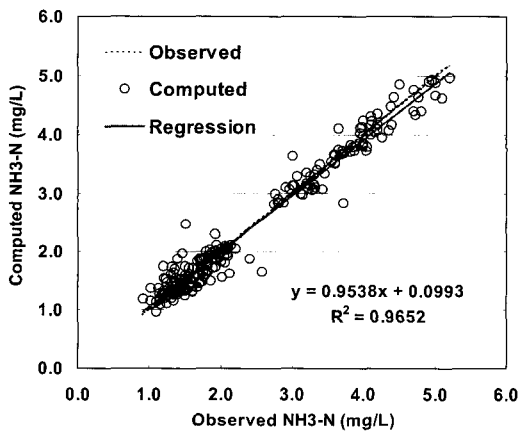
* 95% confidence intervals of estimated intercept(a0) and slope(a1) of linear regressions



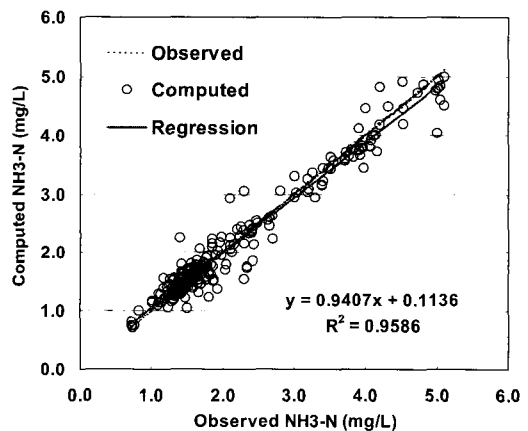
(a) December



(b) January



(c) February



(d) March

Fig. 3. Comparisons of observed and computed NH₃-N concentrations using linear regression

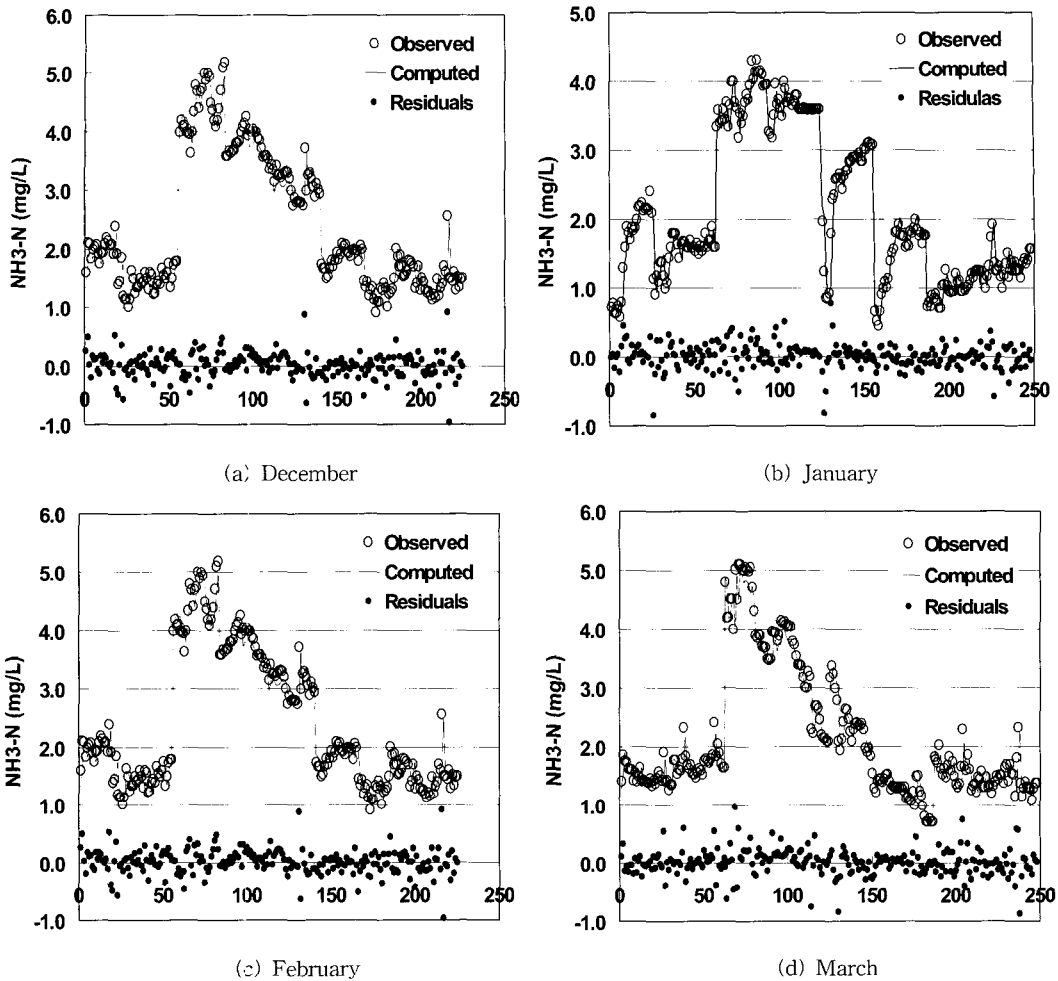


Fig. 4. Time series comparisons of observed and computed $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations and their residuals during model developed period, 1993~2000.

Fig. 4는 12월~3월의 일별 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도 실측값과 모의값의 직접적인 비교와 잔차의 크기를 보여주고 있다. 다중회귀모형은 일별로 급변하는 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도 값 변화를 비교적 잘 모의하고 있는 것으로 나타났으며, 잔차의 범위도 몇몇 데이터를 제외하고는 대체로 $\pm 0.5 \text{ mg/L}$ 이내로 나타났다. 모형은 종종 갑작스런 질소의 농도 상승 또는 하강 변화를 잘 반영하지 못하는 것으로 나타났으며, 이것은 상류의 주요 오염원인 갑천과 미호천에서의 동적인 오염 부하변동이 다중회귀모형에서는 고려되지 않는 때문으로 사료된다.

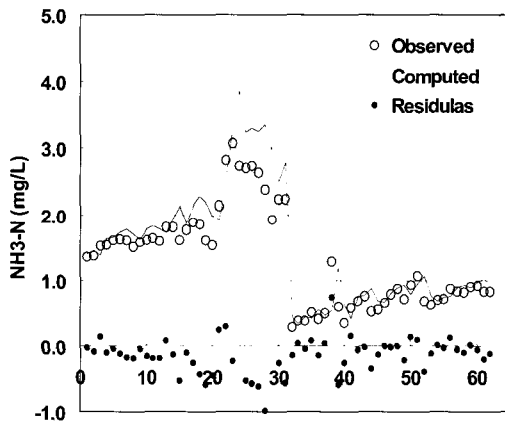
3.2 모형의 검증

2001~2002년의 자료를 이용하여 개발된 다중회귀모형을 검증하고 모형의 성능을 통계적으로 분석한 결과는 Table 5와 같다. 모형의 검증 기간동안, 예측오차 B 값은 모형의 개발 기간과는 달리 음의 값을 보이고 있으며 모의결과는 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도를 $0.048\sim 0.170 \text{ mg/L}$ 정도 과다 산정 하였으며, 실측값과 모의값의 1:1 선형 회귀분석에서도 절편과 기울기의 95% 신뢰구간의 폭이 다소 증가하였다. 그 이유는 다중회귀모형이 상류 유역에서의 지속적인 환경기초시설의 증설로 삭감된

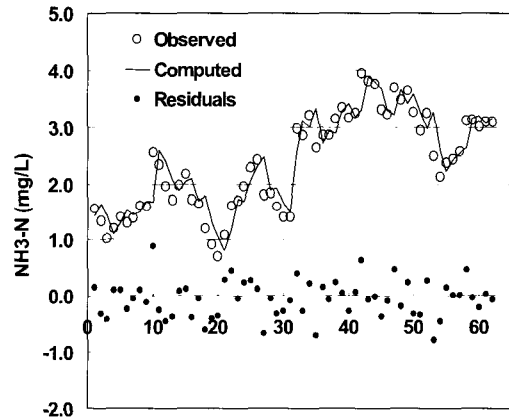
Table 5. Validation of the multiple regression models using data obtained from 2001 to 2002

Month	Linear Regression Parameters				Bf (mg/L)	RMSE (mg/L)	R ²	Em
	ao	*U bound *L bound	a1	U bound L bound				
Dec.	-0.0553	-0.1771 0.0664	1.1712	1.0901 1.2522	-0.170	0.351	0.90	0.77
Jan.	0.3166	0.0731 0.5601	0.8867	0.7899 0.9835	-0.048	0.324	0.86	0.87
Feb.	0.1837	-0.0713 0.4388	0.9614	0.8714 1.0513	-0.077	0.259	0.84	0.90
Mar.	0.1433	0.0128 0.2738	0.9710	0.9086 1.0334	-0.088	0.218	0.94	0.93

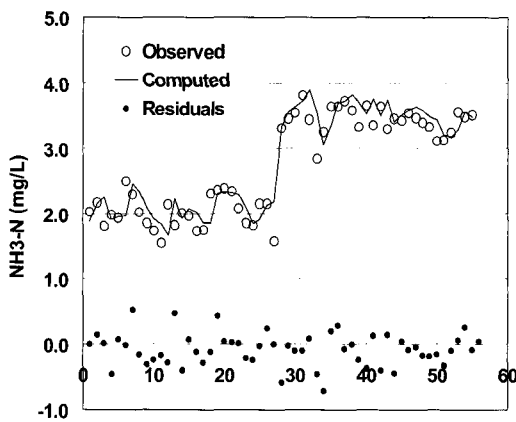
* 95% confidence intervals of estimated intercept(a0) and slope(a1) of linear regressions



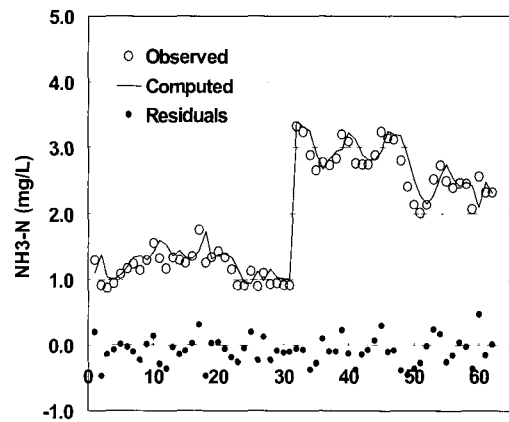
(a) December



(b) January



(c) February



(d) March

Fig. 5. Time series comparisons of observed and computed NH₃-N concentrations and their residuals during validation period, 2001~2002.

오염부하량의 변화를 반영하지 못하기 때문에 사료된다. RMSE값은 0.218~0.351 mg/L 범위로 모형의 개발단계 보다는 오차가 약간 증가하였다. 그리고, E_m 값의 범위도 0.77~0.93수준으로 떨어져 검증기간 동안 모형의 효율이 약간 저하되기는 하였지만, 결정계수값이 0.84~0.94의 범위로 높게 나타나는 등 전반적으로 모형의 적용성은 여전히 높은 것으로 평가되었다.

Fig. 5는 모형의 검증기간에 대한 12월~3월의 일별 NH_3-N 농도 실측값과 모의값의 직접적인 비교와 잔차의 크기를 보여주고 있다. 일부구간에서 모의값과 실측값의 편차가 1.0 mg/L까지 나타났으나, 전반적으로 다중회귀모형은 NH_3-N 농도 값의 일별 변화를 비교적 잘 모의하고 있으며 잔차의 범위도 대체로 ± 0.5 mg/L 이내에 머물렀다.

3.3 댐 방류량에 따른 NH_3-N 농도저감 효과분석

겨울철 동안 금강 하류 부여지점에서 NH_3-N 농도가 높게 나타날 경우, 정수장에서의 정수처리 장애를 해소하기 위해 상류 대청댐에서는 용수공급에 지장이 없는 범위내에서 방류량의 증가가 검토되고 종종 시행되었다. 그러나, 증가된 댐 방류량이 부여지점의 질소농도 저하에 미치는 영향을 사전 또는 사후에 정량적으로 평가할 수 있는 방법이 미비하여 댐 운영자의 의사결정에 어려움이 많았다. 따라서, 대청댐 방류량의 크기가 부여지점에서의 NH_3-N 농도의 저감에 미치는 영향을 평가하기 위해 본 연구에서 개발된 다중회귀모형을 적용하였다. 모형의 적용대상 기간은 최근 가장 높은 NH_3-N 농도가 검출된 2002년 갈수기를 선정하였다. 이 기간 동안 댐 방류량을 각각 5, 10, 20, 30, 50cms로 변화시키면서 얻은 모의 결과를 Fig. 6에 도시하였다.

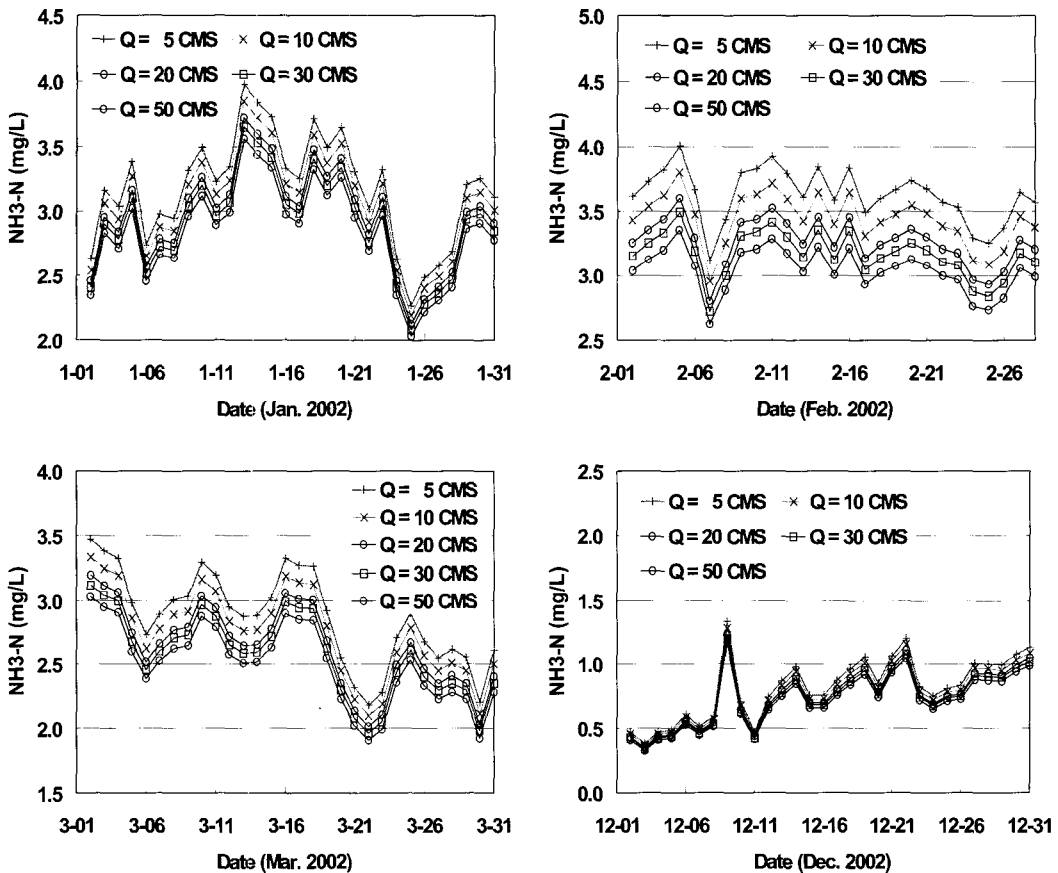


Fig. 6. The effect of Daechong Dam outflow on the reduction of NH_3-N concentrations on January, February, March, and December of 2002

2002년 1월에는 수문상황이 악화되어 지류의 자연유량과 대청댐 유입량이 매우 적었으며 대청댐에서의 방류량은 7cms로 유지되었다. 이에 따라 부여지점에서의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도는 2~4 mg/L의 범위로 매우 높게 나타났다. 모형의 적용결과, 이 기간동안 댐 방류량을 5에서 50cms로 증가시키기에 따른 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도 저감 효과는 최소 0.237, 최대 0.416, 그리고 평균 0.332 mg/L로 나타났다(Fig. 6(a)). 2월에는 금강의 수질이 더욱 악화되어 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 3~4 mg/L로 상승한 반면, 방류량 변화에 따른 농도저감효과는 최소 0.501, 최대 0.643, 평균 0.583 mg/L로 크게 증가하였다. 3월에는 수온의 상승으로 인해 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 2~3 mg/L 범위로 호전되었으며 방류량 증가에 따른 저감효과는 최소 0.278, 최대 0.441, 평균 0.363 mg/L로 나타났다. 2002년 12월에는 홍수기 동안 수 차례의 태풍과 집중호우의 영향으로 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 1.0 mg/L이하로 떨어졌으며, 방류량의 변화에 따른 수질개선효과는 평균 0.105 mg/L로 매우 미미하였다.

결과를 종합해 볼 때, 대청댐 방류량이 부여지점의 질소농도 저감에 가장 큰 영향을 미치는 시기는 수온이 가장 낮고 자연유량이 적어 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 가장 높게 나타나는 2월인 것으로 평가되었다. 따라서, 하류하천의 수질을 고려하기 위해서는 댐 운영자가 용수공급에 지장이 없는 범위에서 가능한 2월에 충분한 댐 방류가 이루어질 수 있도록 장기적인 저수지운영계획을 수립할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 1993~2000년 동안 일별로 실측한 정수장의 원수수질자료와 댐 방류량 자료를 이용하여 겨울철(12월~3월)에 금강수계 부여지점에서의 일별 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도를 예측할 수 있는 다중회귀모형을 개발하였으며, 최근 2년간의 자료를 이용하여 모형을 검증하였다. 개발된 모형은 지난 2002년 갈수기를 대상으로 대청댐 방류량이 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도 저감에 미치는 효과를 분석하는데 적용하였으며, 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 다중회귀분석결과, 겨울철 12월~3월 동안 부여지점의 일별 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 전일의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도와 전일의 대청댐 방류량이며 수온과 알칼리도, 당일의 댐 방류량, 그리고 pH의 영향은 비교적 적은 것으로 나타났다.

(2) 모형의 개발단계에서 실측값과 모의값 간의 결정계수와 모형효율은 모두 0.95이상으로 높게 나타났다. 또한, 잔차의 범위로 대체로 ± 0.5 mg/L 이내에 분포하여 다중회귀모형은 부여지점의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도 예측에 적합한 것으로 평가되었다. 그러나, 모형은 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 3.0 mg/L 보다 높은 경우에 실측값을 0.014~0.022 mg/L 정도 낮게 예측하는 경향이 있었다.

(3) 2001~2002년 자료를 이용한 검증단계에서 모형은 실측값을 0.048~0.170 mg/L 정도 과다 평가하였으며, 이것은 유역내 환경기초시설의 증설에 따른 영향으로 사료된다. RMSE값은 0.218~0.351 mg/L 범위로 약간 증가하였고 결정계수값과 모형효율도 각각 0.84~0.94와 0.77~0.93의 범위로 나타나 개발단계 보다는 모의결과의 정확도가 약간 떨어졌다.

(4) 2002년 겨울철(1~3월, 12월) 동안 대청댐 방류량이 부여지점의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도 저감에 미치는 영향은 수온이 가장 낮고 자연유량이 적어 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 가장 높게 나타나는 2월에 가장 크게 나타났다. 방류량을 5에서 50cms까지 증가시키기에 따라 1월에는 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 평균적으로 0.332 mg/L, 2월에는 0.583 mg/L, 3월에는 0.363 mg/L 감소하였으며, 12월에는 홍수기 동안 수문상황의 호전과 댐 방류량의 증가로 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 1.0 mg/L이하로 유지되었기 때문에 방류량 변화에 따른 수질개선효과가 매우 미미하게 나타났다.

(5) 결론적으로, 본 연구에서 개발된 다중회귀분석을 이용한 수질모의기법은 충분한 기간동안의 실측 운영자료가 확보된 경우에 수치해석 모형이 요구하는 광범위한 경계조건 자료가 없어도 댐 방류량과 하류 조절하천의 수질농도간의 관계를 분석하고, 갈수기 동안 하류 수질을 고려한 저수지운영과 사후평가에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 충북대학교 신진교수 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이와 관련된 분들에게 감사드립니다. 그리고, 자료를 기꺼이 제공해 주신 한국수자원공사의 부여사업소와 물관리센터 관계자 분들께 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

- 강두선, 신현석, 김중훈(1998). “신경망 모형을 이용한 장기 하천 수질의 예측,” 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), 대한토목학회, pp. 23-26.
- 류병로, 한양수(1998). “ARIMA 모형에 의한 하천수질 예측,” 한국환경과학회지, 한국환경과학회, 제7권, 제4호, pp. 433-440.
- 안상진, 연규방, 연인성(2000). “신경망 모형을 이용한 수질예측과 시스템 구축,” 대한상하수도학회, 한국물환경학회 공동추계학술발표회논문집, pp.249- 252.
- 정세웅, 김주환(2001). “갈수기 저수지운영을 위한 댐 하류 수질예측 모형,” 한국수자원학회 학술발표회 논문집(I), 한국수자원학회, pp. 632-637.
- 조정석, 류병로, 한양수 (1999). “전이함수 잡음모형에 의한 하천수질의 시계열분석”. 한국물환경학회지, 제 15권, 제4호, pp. 465-477.
- 한국수자원공사(2000). 갈수기 하류하천 수질보전을 고려한 전략적 대청댐 운영기법 연구.
- 한국수자원공사(1993). 댐방류량이 하천 수질에 미치는 영향에 관한 연구.
- 한국수자원공사(1999). 대청댐 하류 오염물질 이송·확산예측 및 저감대책에 관한 연구.
- 한양수(1999). “상태공간 모형에 의한 하천수질 예측.” 대구대학교 박사학위 논문, 대구대학교.
- Alley, W.(1986). “Regression approximation for transport model constraint sets in combined simulation-optimization studies.” Water Resources Research, AGU, Vol. 22, No. 4, pp. 581-586.
- Chapman, D.(1992). Water quality assessments. A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring. Chapman & Hall, London, pp.69-76.
- Chapra, S.C., and Canale, R.P.(2002). Numerical methods for engineers, McGraw-Hill.
- Chung, S.W., and Kim, J.H.(2002). “Development of artificial neural network models supporting reservoir operation for the control of downstream water quality.” Water Engineering Research, Korea Water Resources Association, Vol. 3, No. 2, pp. 143-153.
- Haggard, B.E., Soerens, T.S., Green, W.R., and Richards, R.P.(2003). “Using regression methods to estimate stream phosphorus loads at the Illinois river, Arkansas.” Applied Engineering in Agriculture, ASAE, Vol. 19, No. 2, pp. 187-194.
- Irish, Jr., L.B., Barrett, M.E., Malina, Jr., J., and Charbeneau, R.J.(1998). “Use of regression models for analyzing highway stormwater loads.” Journal of Environmental Engineering, Vol. 124, No. 10, pp. 987-993.

(논문번호:03-60/접수:2003.07.14/심사완료:2003.11.24)