갈수기 저수지 운영을 위한 댐 하류 수질예측 모형
Water Quality Prediction Model for Reservoir Operation in Dry Period

정세웅, ○김주환

1. 서 론

다목적댐 저수지운영은 홍수조절, 용수공급, 수력발전 그리고 하류 하천수질의 보전을 종합적으로 고려하여야 하므로 다양한 분야의 물관리 기술이 요구될 뿐만 아니라 운영의 효율을 증진시키기 위해서는 수계별 유역특성을 고려한 수량-수질-수력을 종합적으로 고려한 통합물관리체계가 필요하다. 다목적댐저수지는 대부분 상·하류의 정수장에 원수를 공급하고 있으므로 유역-저수지-하천-취·정수장을 연계한 통합운영을 위해서는 수량과 수질을 종합적으로 관리할 필요가 있으며 이를 위해서는 각 수계별 특성에 적합한 분석 모형이 필요하다. 특히, 갈수기 기간중에 대부분의 댐저수지 하류 하천의 유량은 지류로 부터의 유입량이 고갈되어 상류 댐 방류량에 의존하는 비율이 매우 높다. 최근에는 낙동강과 금강에서 갈수기 동안 하류하천의 유량 부족과 수질악화로 인해 댐으로 부터의 증가방류 요청이 잦아지고 있는 실정이다. 갈수기 동안 우리나라 하천의 수질은 상류댐 방류량에 상당한 영향을 받는 것으로 보고되고 있으나, 댐방류량과 하천수질의 정량적인 상관성 분석과 이를 분석할 수 있는 모형의 구축은 매우 미흡한 실정이어서 효율적인 저수지운영의 제약조건이 되고 있다.

최근 갈수기 동안 대청댐 하류 부여지점에서의 암모니아성 질소(NH_3-N)농도는 음용수 수질기준인 0.5 mg/l 보다 훨씬 높게 검출됨에 따라 금강수계 하류부에 위치한 S-정수장의 정수처리 공정에 많은 어려움을 주고 있다. 특히, 지난 1994~1995년 동안의 2년에 걸친 가뭄기간 중에는 암모니아성 질소농도가 음용수 수질기준 보다 약 5 ~ 10배 가량 높게 검출되어 질소처리를 위한 염소투입량의 증가, 염소 부산물 발생 가능성 증가에 따른 정수 수질관리의 어려움, 시설물 부식, pH 및 알칼리도 저하에 따른 보조약품(소석회) 추가투입, 잉여슬러지 발생 등 수처리 공정의 애로뿐만 아니라 경제적으로도 많은 손실이 발생되었다.

본 연구의 목적은 금강수계내에 위치한 대청댐의 방류량이 하류하천의 암모니아 질소농도에 미치는 영향을 분석하고 이를 예측할 수 있는 하천수질모형을 구축하여 갈수기 동안 댐하류의 수질보전을 고려한 적정 댐 방류량을 산정함으로써 보다 효율적인 대청댐저수지 운영방안을 도출하는 데 있다. 이를 위하여 방류조건별로 부여지점의 암모니아성 질소농도를 예측하기 위한 중회귀모형과 신경망모형을 개발하였다. 개발된 모형은 해당월의 암모니아성 질소농도를 댐방류량, 하천의 수온과 알칼리도, 그리고 질소농도의 자기상관성을 고려하여 예측하도록 하였으며 1993~1998년 자료를 사용하여 개발하고 1999~2000년 자료를 사용하여 검증하였다. 개발된 모형은 결정계수가 0.92이상, 표준개산오차가 0.4이하로 매우 예측성능이 우수한 것으로 평가되었다.

---

* 한국수자원공사 댐관리처 물관리팀
**한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

2. 대상유역 수문 및 수질현황

금강유역의 수원은 전라북도 장수군 장수읍 수분리 神舞山(EL.896.8m)에서 발원하여 북쪽으로 흐르면서 남대천, 봉황천, 초강천, 보청천, 등과 차례로 합류한 후 대청댐에 유입된다. 이후 대청조정지댐을 지나 신탄진 부근에서 갑천과 합류하고 흐름은 다시 북서쪽으로 향하여 부강을 조금 지나서 미호천과 합류하며 이후는 비교적 남서류하면서 금남교, 공주를 지나 부여의 규암지점에 이르러 유향은 남동쪽으로 크게 바뀌어 강경까지 유하하고 이곳에서 논산천과 합류한 후 유로는 다시 남서쪽으로 바뀌어 금강 하구둑을 거쳐 서해로 유입된다. 유역은 금강본류외에 10개의 지방1급 하천과 16개의 지방2급 하천으로 구성되어 있으며 총유로연장은 395.9km, 유역면적은 9,810㎢이며, 연평균 강수량은 1,269mm로서 우리나라 연평균 강수량 1,274mm에 약간 못미치고 있다.

대청댐은 현재 담수중인 상류의 용담댐을 제외하면 금강수계의 유일한 다목적댐으로서 생공 및 농업용수를 공급하고 있으며 홍수기에 홍수를 댐에 저류 하였다가 갈수나 평수기에 발전용수로 이용하고 대청댐 하류에 위치한 조정지댐에 의해 하류지역에 조절방류로 각종 용수를 공급하고 있다. 대청댐의 연간 용수공급능력은 1,649백만 m³으로 이중 생공용수는 1,300백만 m³, 농업용수는 349백만 m³이다.

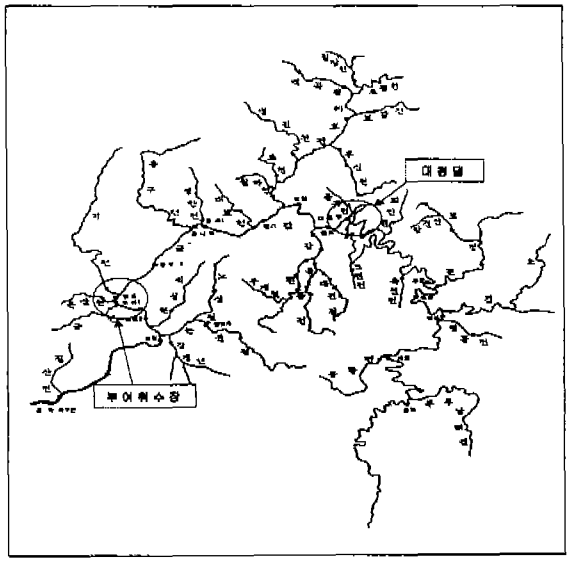


그림 1 금강수계 하천 개요도 및 수질측정망

다목적댐의 주요한 기능은 하절기에 홍수를 조절 · 저장하고, 평갈수기 동안에는 확보된 저수량으로 용수공급, 수력발전, 그리고 하류수질 보전을 위한 방류를 수행하는 것이다. 즉, 다목적댐은 홍수기동안 하류 하천의 홍수의 크기와 빈도는 줄여주고 갈수기 하천유량은 증가시켜 주는 역할을 하는 것이다. 갈수기 동안 하천의 유하량 크기는 하천의 자정능력에 큰 영향을 미치므로 하천 수질에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소 중의 하나이다. 대청댐은 상류 용담댐을 제외하면 금강의 유일한 다목적댐으로써 하류 금강의 유하량에 직접적인 영향을 준다.

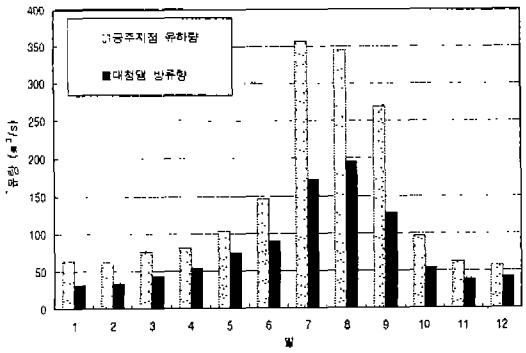


그림 2 대청댐 방류량과 공주지점 월평균 유량비교
(자료 1981~1998)

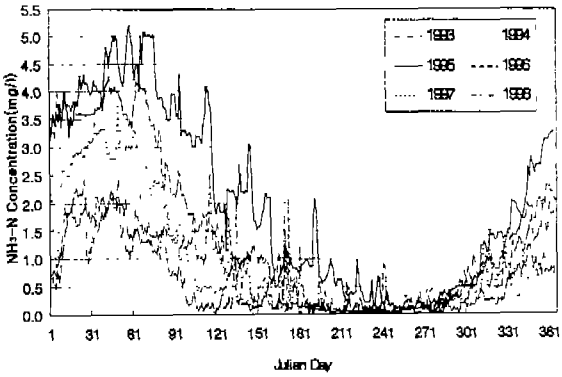


그림 3 S-정수장 일별 암모니아성 질소 농도 변화 (분석자료 1993~1998)

그림 2는 1981~1998년 기간동안의 공주지점 월평균 하천 유하량과 대청댐의 월평균 방류량을 비교하여 보여 주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 홍수기 중에는 전체하천 유량대비 댐 방류량이 차지하는 비율이 50% 미만이며, 갈수기 동안에는 대체적은 60 ~ 80% 범위이므로 상류 댐 방류량에 의존하는 비율이 높은 것으로 나타났다. 또한 댐 방류량과 하천의 유하량 사이의 상관계수(r)는 0.98로서 매우 높은 상관관계를 보여주었다.

높은 암모니아성 질소(NH_3) 농도는 특정 수소 이온농도(pH) 상태에서 생물체에 독성이다. 보통 물속에 존재하는 암모니아는 이온화 되지않은 형태의 암모니아(NH_3)와 이온화된 암모니아, 즉 암모늄 이온 (NH^{4+})이 평형을 이루고 있다. 총 암모니아 농도는 이 두가지 형태의 농도값을 합한 것이다. 암모니아는 또한 여러 가지 금속이온과 결합된 형태로 존재하기도 하고 콜로이드성입자, 부유물질, 그리고 하천 또는 저수지 바닥 퇴사에 흡착되기도 한다. 이온화 되지않은 암모니아(NH_3)의 농도는 온도, pH 그리고 총 암모니아 농도에 의해 결정된다. pH의 증가에 따라 상당한 양의 암모니아가 NH_3의 형태로 휘발(Volatilization)을 통해 감소할 수 있다. 계절적으로 하천에서 암모니아의 농도는 온도가 낮고 미생물의 활동이 활발하지 않은 겨울철에 높게 나타나고 반면에 유량이 풍부하고 온도가 높은 하절기에는 질산화 작용 때문에 낮게 검출되는 경향이 있다. (그림 3 참조)

3. 댐하류 수질예측 모형

댐 하류 수질을 고려한 월별 저수지운영계획을 수립하기 위해서는 댐방류량 변화에 따른 하천 수질을 예측 할 필요가 있는데 그 방법에는 크게 수학적모형을 사용하는 방법과 통계모형을 적용하는 방법 등으로 구분될 수 있다. 본 연구에서는 월별 대청댐 방류량 변화에 따른 하류의 암모니아성 질소 농도를 예측하기 위해 중회귀모형과 신경망 모형을 개발하여 실무에서 상호보완적으로 사용할 수 있도록 하였다. 중회귀모형과 신경망 모형은 기왕의 방대한 운영자료로부터 유도되는 경험적 모형으로 일단 구축되면 수학적 모형이 요구하는 상하류 경계조건의 많은 입력자료를 요구하지 않기 때문에 즉시에 활용할 수 있다는 장점이 있다. 댐하류 하천의 암모니아성 질소농도에 영향을 미치는 인자들로서 상류댐 방류량, 하천 수온, 알칼리도 그리고 암모니아성 질소의 자기상관성 등을 고려하여 신경망 구조를 선택하였다. 암모니아성 질소의 자기상관성을 고려하기 위해 월별 자기상관계수를 분석한 결과 해당월의 암모니아성 질소농도는 전월과 전전월의 농도에 많은 영향을 받으며 3개월전의 농도에도 다소 영향을 받는 것으로 나타났다.

중회귀모형과 신경망모형은 1993년 1월부터 1998년 12월까지 총 72개의 월별 자료를 사용하여 개발하였으며 개발된 모형은 다시 1999년 1월~2000년 12월 자료를 사용하여 검증하였다.

3.1 중회귀모형

중회귀모형은 2개이상의 독립변수를 사용하여 종속변수를 산정하는 방법으로 선형중회귀모형과 지수형 중회귀모형 등 여러 가지 형태의 관계가 가능하다. 본 연구에서는 선형과 지수형 모형을 모두 검토하였으나, 선형 중회귀모형은 음의 농도값을 발생시키는 단점이 있어 지수형 모형을 채택했다. 중회귀모형의 독립변수는 댐방류량, 질소농도의 월별 자기상관성(Lag-1), 그리고 S-정수장의 원수 수질측정 인자들간의 상관분석을 통해 암모니아성 질소농도와 상관계수가 높은 항목을 포함시켰다. 그림 4에서는 각 독립변수들과 암모니아성 질소농도간의 상관계수를 볼 수 있다. 각 상관계수는 1993년 1월부터 2000년 12월의 월별 평균값을 사용하였으며 분석에 사용된 총자료수는 96개이다. 해당 월의 암모니아성 질소농도에 영향을 많이 미치는 인자는 전월의 암모니아성 질소농도, 알칼리도, 수온, 댐방류량 순으로 나타났다. 댐방류량과의 상관계수는 12월~3월 자료

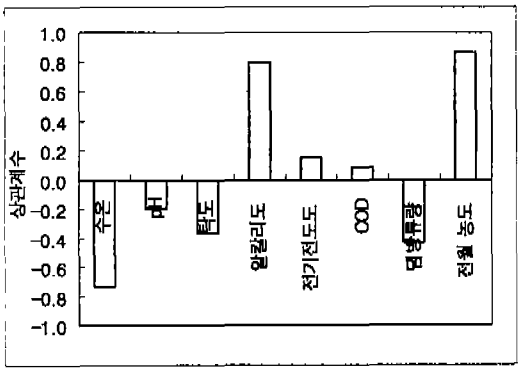


그림 4 월별 암모니아성 질소농도와 각 독립변수 인자간의 상관계수

만을 사용하여 분석한 값보다 비교적 낮게 나타났으며, 그 원인은 홍수기가 포함된 때문이다.

각 인자간의 상관분석결과를 토대로 하여 지수형 중회귀모형은 다음과 같이 구성하였다.

Model Ⅰ :

$$C_t = \beta_0 \cdot Q_t^{\beta_1} \cdot T_t^{\beta_2} \cdot (ALK)_t^{\beta_3} \cdot C_{t-1}^{\beta_4} + \varepsilon_t$$

여기서, C_t = 해당월의 평균 암모니아성 질소 농도, C_{t-1} = 전월의 평균 암모니아성 질소 농도, Q_t = 해당월의 평균 댐 방류량, T_t = 해당월의 평균 원수 수온, $(ALK)_t$ = 해당월의 평균 원수 알칼리도, 그리고 ε_t는 계산값과 관측값의 차이를 나타내는 오차이다.

3.2 신경망 모형

댐방류에 따른 하류 수질농도를 추정하기 위한 신경망 모형은 방류량과 하천에서 관측된 수질 및 환경인자로 구성된 입력뉴런과 하천의 암모니아성 질소농도를 추정하기 위한 출력뉴런들로 구성된다. 이는 신경회로망의 다층퍼셉트론으로서 여러 개의 처리소자를 각 계층, 즉 입력자료를 받아들이는 입력층(Input Layer)과, 결과를 나타내는 출력층(Output Layer) 그리고 두 개의 층 사이에 중간층(Hidden Layer)을 두어 각 패턴마다 필요한 정보를 학습시킬 수 있도록 한 것이다. 각 층을 구성하는 뉴런은 뉴런간의 연결강도를 합해주는 결합함수와 자료의 범위에 따라 뉴런의 동작범위를 결정해 주는 전달함수(Transfer Function)로 구성되어 있는데 본 연구에서는 시그모이드(Sigmoid) 함수를 전달함수로 사용하였으며 수질변화 요인으로 작용하는 입력자료와 수질농도인 출력자료의 비선형 관계를 구축하기 위한 신경망의 학습방법으로 역전파 알고리즘(Back Propagation ; BP)을 사용하였다. 역전파 알고리즘은 입력패턴과 출력패턴의 집합으로 구성되는 학습패턴을 신경망에 입력하여 계산값과 관측값의 차이가 설정된 오차의 범위까지 최소화 하도록 모형의 매개변수인 각 층간의 가중치(weight)와 Bias를 변화시켜 가는 방법으로 다음식과 같이 제곱오차의 합이 최소가 되는 방향으로 반복적으로 진행되어 신경회로망 모형의 연결강도를 최적화시킴으로써 모형을 적용시켜 가는 것이다.

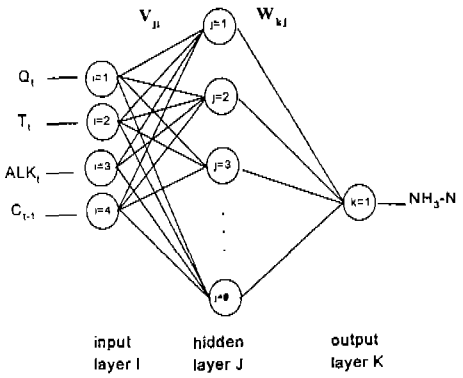


그림 5 신경망 모형(Model Ⅱ) 구조

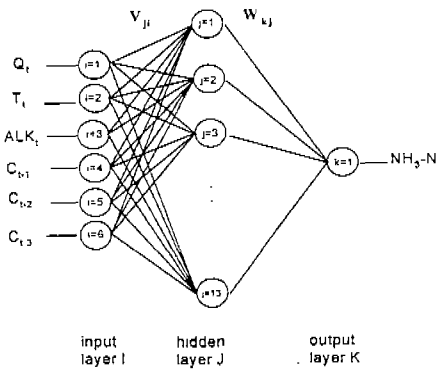


그림 6 신경망 모형(Model Ⅱ) 구조

댐하류 하천의 암모니아성 질소농도에 영향을 미치는 인자들로서 상류댐 방류량, 하천 수온, 알칼리도 그리고 암모니아성 질소의 자기상관성 등을 고려하여 다음과 같이 구성하였으며 그림 5 및 그림 6과 같다.

Model Ⅱ $C_t = ANN1\ [Q_t, T_t, ALK_t, C_{t-1}]$

Model Ⅲ $C_t = ANN2\ [Q_t, T_t, ALK_t, C_{t-1}, C_{t-2}, C_{t-3}]$

4. 모의결과 및 분석

중회귀모형과 신경망모형의 구성 그리고 모형의 예측성능을 비교한 결과 세가지 모형 모두 R^2 값이 0.92이상으로 우수하게 나타났으며 신경망모형이 중회귀 모형보다 다소 성능이 뛰어난 것으로 평가되었으며 그 결과를 표 1에 수록하였다.

표 1 중회귀 및 신경망모형의 구성 및 모의성능 비교

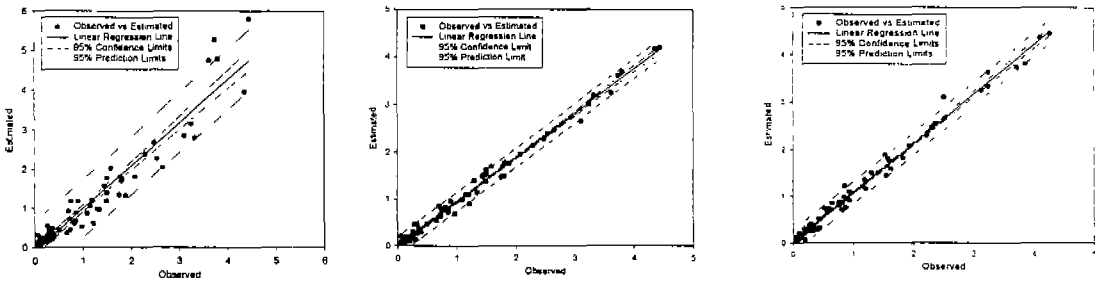
구 분	모 형	구 성	모형성능	
			R^2	RMSE
Model Ⅰ	중회귀 모형	$C_t = M-REG\ (Q_t, T_t, ALK_t, C_{t-1})$	0.92	0.38
Model Ⅱ	신경망 모형 1	$C_t = ANN1\ [Q_t, T_t, ALK_t, C_{t-1}]$	0.99	0.14
Model Ⅲ	신경망 모형 2	$C_t = ANN2\ [Q_t, T_t, ALK_t, C_{t-1}, C_{t-2}, C_{t-3}]$	0.99	0.14

관측값과 각 모형에 의한 계산값과의 관계는 그림 7에 제시하였다. 그림에서 점선구간은 평균값에 대한 95% 신뢰구간을 의미하며 실선구간은 추정치에 대한 95% 신뢰구간을 나타낸다. 그림에서 신뢰구간의 범위를 근거로 볼 때 신경망 모형의 예측성능 더 우수하다는 것을 알 수 있다. 그러나, 중회귀모형은 암모니아성 질소농도가 4mg/L이상의 높은 값에서 모형에 의한 계산값이 관측값보다 다소 과다하게 산정되는 것을 볼 수 있다. 이것은 하천의 유량이 절대부족한 갈수상황에서 갑천과 미호천 같은 주요 오염지천으로부터 유입되는 수질의 변동이 매우 큰 것이 원인인 것으로 판단된다. 또한 모형검증을 위하여 개발에 사용된 자료기간과 다른 독립된 자료군을 이용하여 개발단계에서 확정한 모형의 정확도를 확인하는 절차로서 1999년 1월~2000년 12월 자료를 사용 수행하였다.

표 2는 각 모형별로 검증기간 동안의 월별 관측값과 예측값 사이의 결정계수와 표준계산오차를 보여주고 있다. 결정계수와 표준계산오차를 기준으로 볼 때, 모형의 성능은 Model Ⅲ, Model Ⅰ, Model Ⅱ의 순으로 나타났다. 중회귀모형은 R^2값이 0.92, RMSE가 0.15로서 검증단계에서도 매우 만족스런 결과를 보여주고 있으나, 수질의 자기상관성을 Lag-1까지만 고려한 신경망모형 ANN1은 개발단계에서 보다 다소 성능이 떨어지는 것으로 나타났다. 신경망 모형은 수질의 자기상관성을 Lag-3까지 고려할 경우 모의 결과가 보다 정확한 것을 알 수 있다.

표 2 중회귀 및 신경망 모형의 검증 결과 비교

구 분	모 형	구 성	모형성능	
			R^2	RMSE
Model Ⅰ	중회귀 모형	$C_t = M-REG\ (Q_t, T_t, ALK_t, C_{t-1})$	0.92	0.15
Model Ⅱ	신경망 모형 1	$C_t = ANN1\ [Q_t, T_t, ALK_t, C_{t-1}]$	0.90	0.23
Model Ⅲ	신경망 모형 2	$C_t = ANN2\ [Q_t, T_t, ALK_t, C_{t-1}, C_{t-2}, C_{t-3}]$	0.95	0.13



(a) Model Ⅰ (M-REG) (b) Model Ⅱ (ANN1) (c) Model Ⅲ (ANN2)

그림 7 각 모형에 대한 관측값과 계산값 비교결과

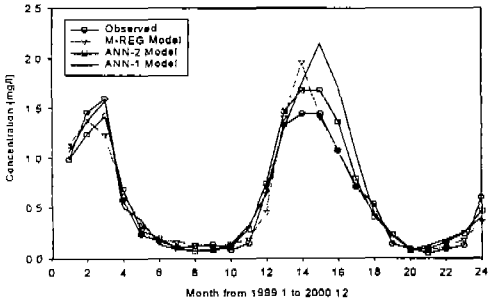


그림 8 모형의 검증결과 비교

모형의 검증기간 동안의 관측값과 각 모형에 의한 모의결과는 그림 8에 검증기간 동안의 관측값과 각 모형의 계산값을 시계열로 비교하였다. 신경망 모형 Model Ⅱ는 1999년 갈수기에는 관측결과와 대체로 일치하였으나 2000년의 1월~6월 사이에 관측값을 다소 과대평가하는 것으로 나타났다. Model Ⅰ과 Model Ⅲ는 월별로 관측값과 계산값 사이에 다소 편차는 있으나, 대체로 암모니아성 질소농도의 변화 추세를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서의 분석결과, 갈수기 기간 중 대청댐 방류량은 하류 하천의 암모니아성 질소 농도에 영향을 미치는 것으로 나타고 있으며 댐저수지 운영계획 수립시 방류조건별로 하류지점의 암모니아성 질소농도를 검토하기 위해 중회귀모형과 신경망모형을 개발하였다. 개발된 모형은 해당월의 암모니아성 질소농도를 댐방류량, 하천의 수온과 알칼리도, 그리고 질소농도의 자기상관성을 고려하여 예측하도록 하였으며 1993~1998년 자료를 사용하여 개발하고 1999~2000년 자료를 사용하여 검증하였다. 개발된 모형은 결정계수가 0.92이상, 표준개산오차가 0.4이하로 매우 예측성능이 우수한 것으로 평가되었다. 따라서 갈수기 댐하류의 수질을 고려한 댐운영을 위해서는 하류부의 수질을 예측하여 이에 대한 적정 방류량의 월별 배분이 검토되어야 할 것으로 판단된다. 월별 방류량 배분계획은 저수지운영의 우선순위가 하류수질의 보전보다는 안정적인 용수공급에 있으므로 저수지의 용수공급능력을 고려하여 분석되어야 하며 향후 최적화모형 등을 적용하여 수질을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 용수공급 미충족 등을 추가로 검토가 필요하다.

참 고 문 헌

1. Chapman, Deborah, 1992. Water Quality Assessments. A guide to the use of biota sediments and water in environmental monitoring. Chapman & Hall.
2. 김주환, 1993. 신경회로망을 이용한 하천유출량의 수문학적 예측에 관한 연구, 박사학위논문, 인하대학교
3. 한국수자원공사, 1993. 댐방류량이 하천 수질에 미치는 영향에 관한 연구.