

담수호의 수질예측 및 부영양화 방지에 관한 연구

A Study on Water Quality Modeling and Control of Eutrophication for Estuary Reservoir

권순국* · 유명진** · 방기웅*** · 고덕구****
Kwun, Soon Kuk · Yu, Myong Jin · Bang, Ki Woong · Koh, Deuk Koo

Abstract

The purpose of this study was development and application of a multiple box model for long term prediction and control of water quality in estuary reservoir. The model was composed of one main model and two sub models for hydrology and water quality. Water quality constituents for modeling were temperature, chlorophyll-a, BOD, DO, N, and P. The model had been applied to Asan reservoir, and the reservoir had been divided into three boxes-two boxes for a upper layer and one box for a lower layer-to represent stratification. The model appeared satisfactory in representing long term trend of water quality variations by comparing measured and simulated results. According to the application of the model to study alternatives for water quality improvement to deal with increase in future pollution load, use of non-phosphorous detergent for chlorophyll-a, advanced sewage treatment for BOD and T-N, reduction of livestock waste for T-P were evaluated as more effective ones than any others, respectively.

要 旨

본 연구의 목적은 담수호에 적합한 Multiple Box모형을 개발, 적용하여 장기 수질예측을 할 수 있도록 하므로써 담수호에서의 수질관리 방안을 제시하는데 있다. 모형은 수문 부모형과 수질 부모형으로 구성되어 있으며, 수질 부모형에서 고려한 수질항목은 수온, Chlorophyll-a, BOD, DO, N과 P 등이었다.

본 모형의 적용은 아산호를 대상으로 시행하였으며, 호의 수문환경조건을 고려하여 호를 상층은 2개의 Box, 하층은 1개의 Box 등 총 3개의 box로 분할하였다.

수질예측모형을 아산호에 적용한 결과 대체로 장기적 수질변화추세를 잘 나타내고 있는 것으로 평가되었다.

*正會員 · 서울대학교 농과대학 농공학과 교수

**正會員 · 서울시립대학교 공과대학 환경공학과 교수

***正會員 · 서울시립대학교 공과대학 환경공학과 박사과정

****正會員 · 서울대학교 부속 농업개발연구소 연구원

개발된 수질모형의 미래의 오염부하량을 입력하여 수질개선 방안들을 비교한 결과, Chlorophyll-a의 경우 무린세계의 도입이, BOD와 T-N의 경우 고도하수처리시, T-P의 경우 축산폐수의 저감시 각각 효과가 큰 것으로 평가되었다.

1. 序 論

담수호란 용수 수요량이 증가됨에 따라 대량의 용수확보수단으로 집수구역의 최말단인 하구 또는 해면을 제철하고 해수를 담수화하여 조성한 호를 말한다.⁽¹⁾ 우리나라에서는 1970년대에 들어 대단위 간척사업과 함께 간척농지와 배후 농경지의 농업용수확보를 목적으로 담수호를 개발하기 시작하였으며, 현재 아산호를 비롯하여 삼교호, 영산호 등이 이미 건설되었고, 금강, 시화, 새만금 등에서도 건설 또는 계획 중에 있어 서해안 개발계획에 따른 중요한 수자원으로 평가되고 있다. 그러나 담수호가 주로 하천의 최말단에 설치되는 관계로 하천 상류구역의 미처리된 도시하수, 공장폐수, 농·축산폐수 등의 유입으로 일반적으로 수질이 불량한 경우가 많으며, 현재의 수질이 양호하다 하더라도 수자원의 확보와 담수화 과정에서 수질이 급속히 악화되는 경우가 많다.

우리나라 담수호의 환경오염 내지 부영양화에 대한 조사, 연구는 수질조사로는 농업진흥공사에서⁽²⁾ 1979년 이후 년차별로 조사하여 왔으며, 환경청에서도⁽³⁾ 매년 주요 담수호에 대해 조사 발표하고 있다. 또한 부영양화 현상 평가를 위한 연구로서 Vollenweider모형 등의 부영양화 모형을 삼교호, 아산호, 해남호, 낙동강 하구연호 등에 적용한 바 있고^(4, 5), WQRRS모형⁽⁶⁾ 및 Multiple Box모형⁽⁷⁾을 개발하여 수질예측을 위해 아산호에 적용한 예가 있으나, 하천상류의 댐호와는 달리 연구가 미흡한 실정이다.

담수호의 부영양화는 구역의 토지이용현황, 식생과 토양, 도시화와 산업화 정도 등의 구역특성과 호의 수리·수문, 지형 등의 육수학적 특성에 따라 그 변화가 다양하며, 또한 계절에 따라서도 변하므로, 호와 구역의 제현상과 특성을 종합적으로 파악하여야만 호의 영양상태를 정확하게 평가 및 예측할 수가 있게 된다.^(8, 9)

따라서 본 연구에서는 우리나라의 대표적인 담수

호의 하나인 아산호를 대상으로 1987-1989년 동안 3개년에 걸쳐 유역특성과 수질을 조사 분석한 내용을 바탕으로 부영양화를 평가하고, 담수호 수질예측모형으로 장래수질을 예측함으로써, 부영양화 방지대책과 관련한 담수호 수질관리방안을 제시하는 것을 목적으로 실시되었다.

2. 수질예측모형의 원리

본 연구에서 개발하여 이용한 모형은 담수호의 중·장기 수질예측모형인 Multiple Box모형으로서 담수호를 여러개의 Box로 분할하고 각 Box에서의 순별 평균수질을 예측하는 모형이다. 이 모형은 식물성 플랑크톤을 중심으로 영양염류와 기타 인자들의 상호 관계를 정량화한 일종의 생태학적 모형으로 구조와 기본식은 다음과 같다.

2.1 모형의 기본가정

- ① Box에 유입한 물질은 완전혼합되어 유출한다.
- ② Box간 혼합함은 교환유량과 인접 Box간의 농도차와의 곱으로 나타낸다.
- ③ 계산시간은 1일로 하며, 계산에 사용되는 수문자료 등은 순별 평균치를 사용한다.

2.2 모형의 기본식

연속형태의 이류분산방정식(advection-diffusion equation)으로부터 각 Box의 평균화에 집중상수화한 이산형태의 방정식으로 식(1)과 같이 취하였다.

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = \sum_j \left[\underbrace{(Q_{0j}C_j - Q_{ij}C_i)}_{\text{①}} + \underbrace{\frac{E_{ij}A_{ij}}{l_{ij}}(C_j - C_i)}_{\text{②}} \right] - \underbrace{k_i V_i C_i + Q_{r_i} C_r_i}_{\text{③}} \quad (1)$$

여기서,

- | | |
|----------------------|-----------------------|
| V_i : Box i의 체적 | l_{ij} : Box중심간 거리 |
| Q_{0j} : 이류량 | k_i : 반응계수 |
| C_i : Box i의 평균농도 | Q_{r_i} : 횡유입량 |
| E_{ij} : 확산계수 | C_{r_i} : 평균 횡유입 농도 |
| A_{ij} : Box간 경계면적 | |

식(1)에서 ①은 Box간 이류에 의한 물질 이동량이며, ②는 Box간 교환유량에 의한 물질교환량을, ③은 반응 및 횡유입에 의한 물질 변화량을 나타낸다. ②에서 $(E_{ij} \cdot A_{ij}/L_j)$ 는 Box i와 j와의 교환유량(Q_{ij})을 의미하며, 교환유량은 확산계수(E)와 경계면적(A)이 커지면 증가하고 Box간 중심거리(L_j)가 길어지면 감소하게 된다.

2.3 Box의 분할

모형에서 필요한 최소한의 Box분할수는 이류항과 분산항과의 비($P_r = Q/Q_d$)와 변화항과 이류항과의 비($P_k = VK/Q$), 그리고 허용오차와의 관계로부터 결정될 수 있으며, Box분할 위치는 $Q/(AE)$ 의 값이 큰 곳으로서 교환유량(Q)을 포함한 체류시간이 가급적 균등하게 되도록 분할하는 것이 오차를 줄이고 비정상특성을 제대로 나타낼 수 있다⁽⁶⁾.

아산호의 호분특성을 살펴보면 상류부는 폭이 좁고 굴곡이 심하며, 하류부는 저류부로서 수면적이 넓고 수심이 점차 깊어지는 형태를 갖고 있으며, 또한 임⁽⁷⁾의 연구결과에 따라 아산호를 그림 1과 같이 3 Box로 구분하였다.

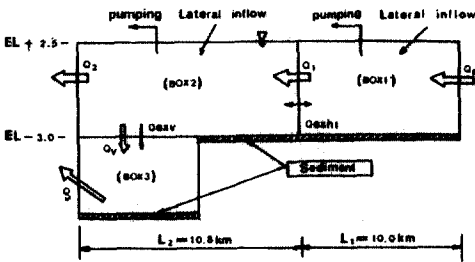


그림 1. Segmentation and mass transfer system of Multiple Box model.

2.4 모형의 구성

2.4.1 흐름계통도

Multiple Box모형은 크게 담수호의 수리현상과 호내 물질전달체계를 해석하는 수리·수문 부모형과 호내의 영양염 순환과정과 유입오염부하량에 따른 수질인자간의 반응을 해석한 수질 부모형으로 나누어진다. 각각의 수질항목 계산과정을 컴퓨터 프로그램화하였으며, 그 흐름도는 그림 2와 같다.

2.4.2 수질변화의 동역학(Kinetics)

본 모형의 주요 계산항목은 그림 3에서와 같이 부영양화의 지표가 되는 식물성 플랑크톤을 중심으

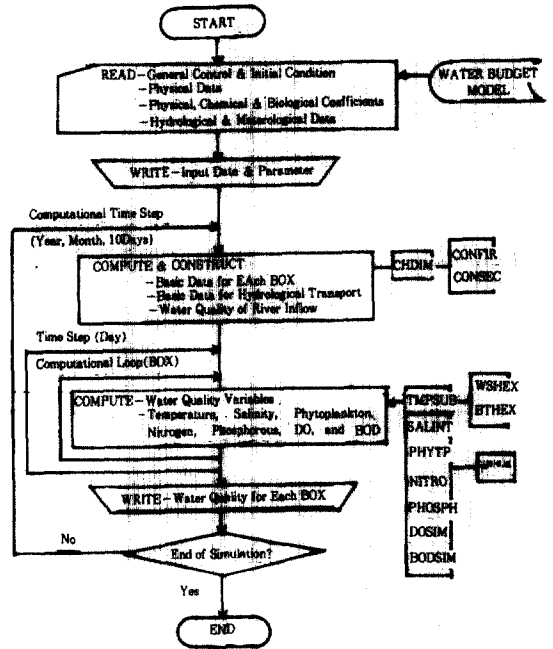
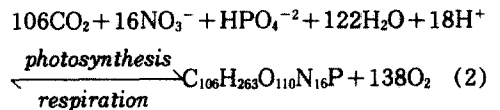


그림 2. Flow chart of the computer program for Multiple Box model.

N, P, BOD, DO 등으로 구성하였다. 이들 물질의 변화는 일정시간에 식물성플랑크톤의 성장과 사멸에 영향을 미치는 수온, 光 등의 물리적조건과 질소, 인 등의 무기염류에 의해 증감량을 계산하고, 이 증감량에 의해 N, P, BOD, DO 농도의 변화를 예측하는 과정으로 시간 및 공간에 따른 수질변화를 예측하였다. 여러 수질항목 중 식물성플랑크톤, N, P, BOD 및 DO의 반응식을 다음에 기술하였다.

(1) 식물성 플랑크톤

식물성플랑크톤은 식(2)와 같이 광합성에 의한 성장과 호흡 및 동물성 플랑크톤에 의한 포식으로 감소한다. 식물성 플랑크톤의 성장은 수온, 광도, 영양염류 등에 영향을 받고, 그 양은 Chlorophyll-a 농도로 나타내었으며, 그 반응식은 표 1에 나타내었다.⁽¹¹⁾



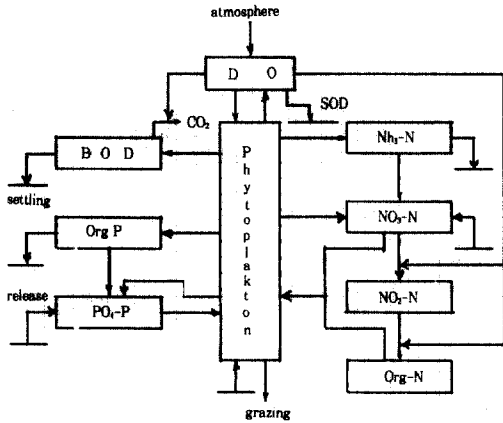


그림 3. Relation among components

또한 본 모형에서 수온은 호수면 열수지와 바다층의 열수지로 구분하여 각각에 대해 열흐름 방정식에서 열에너지를 계산함으로써 예측하였으며⁽²⁾, 광감쇠계수(k_d , 1/m)는 현장에서 투명도(SD: Secchi disc depth, m)를 실측하여 식⁽³⁾과 같이 구하였다.

$$k_d = 1.7/SD \quad (3)$$

(2) 질소(Nitrogen)

질소는 유기질소(organic-N)와 무기질소(NH_3-N , NO_2-N , NO_3-N)로 구분하여 식물성플랑크톤의 내호흡 및 사멸, 분해에 의해 유기질소 및 NH_3 가 증가하며, 성장에 의해 NH_3 와 NO_3 가 감소되고, 질산화(nitrification)에 의해 $NH_3 \rightarrow NO_2 \rightarrow NO_3$ 로 변화되며, 유기질소의 침강과 NH_3 의 용출에 의해 변화된다. 각 질소상태의 반응식도 표 1에 나타내었다.

(3) 인(Phosphorus)

인은 질소와 같이 유기인(organic-P)과 무기인(PO_4-P)으로 구분하여 식물성 플랑크톤의 사멸, 분해에 따라 인이 증가되고, 성장에 따라 PO_4-P 가 감소되며, 유기인의 침강, PO_4-P 의 용출에 의한 변화도 고려하였으며, 그 반응식은 표 1에 나타내었다.

(4) BOD, DO

BOD는 식물성 플랑크톤의 사멸에 의해 증가되며, 미생물에 의한 BOD 분해와 침강에 의해 감소된다. 또한 DO는 대기로부터 재포기, 식물성 플랑크톤 성장에 따라 증가되며, BOD 분해, 질산화와 SOD(sediment oxygen demand)에 의해 감소되도

록 나타내었다.

3. 대상호 및 조사방법

3.1 대상 담수호의 개요

대상지구로서는 호의 수면적이 크고 호분형태가 복잡하며, 수질오염의 심각성이 예상되는 호로서 수년간 수리·수문 및 수질자료의 구축이 용이한 아산호를 선정하였다. 아산호는 농업용수개발을 위해 1970년 착공하여 1973년 준공된 호로서 총 저수량 142백만톤으로 인근 간척지등 144.2km²에 관개용수 115백만톤을 공급하고 있으며, 이 중 7백만톤은 남양호의 부족량을 보충하고 있다.

유역면적은 1634.5km²으로 행정구역상 경기도와 충청남도 2개도의 수원, 송탄, 천안, 평택의 4개시, 7개군, 8개읍, 33개면을 포함하며, 호상류부에 진위천, 안성천이 합류하여 유입한다. 이 외에도 호변에 둔포천, 도대천, 신연천 등의 지천이 유입되고 있다.

아산호유역과 방조제 현황은 표 2와 같다.

3.2 조사방법 및 내용

3.2.1 수리·수문 조사

호류특성을 파악하기 위해 1987-1988년 동안 6회에 걸쳐 호내 6개 지점(수질측정지점과 일치)에서 수심별 유속과 유향을 조사하였다.

또한 호로 유입하는 하천유역을 15개의 소유역으로 구분하여 그 중 수위·유량자료가 있는 2개 유역은 건설부의⁽⁴⁾ 수위-유량곡선을, 기타 유역은 장기 유출전산모형인 USDAHL-74/SNUA 수문모형을 적용하여 일별 유입량을 산정하였고, 호의 물수지분석을 통해 호의수위, 방류량, 양수량 등을 추정하였다.⁽¹⁾

3.2.2 수질조사

호 및 유입하천의 수질을 조사하기 위해 1987-1989년 사이에 총 8회에 걸쳐 호는 6개 지점, 유입하천은 4개 지점에서 조사, 분석하였다. 조사항목은 유입하천은 수온, DO, pH, BOD, SS, NH_3-N , NO_2-N , NO_3-N , T-N, PO_4-P , T-P 등의 11개 항목이며, 호에서는 하천조사항목 이 외에 염도, 투명도, Chlorophyll-a 농도와 조류(algae)를 조사하였다.

호 및 유입하천의 수질조사지점은 그림 4와 같다.

표 1. Kinetic equations

Component	Basic equation
Phytoplankton	$\frac{dA}{dt} = (GR - DR - ST - DG) \cdot A$ $GR = GR_{max}(20^{\circ}C) \cdot f(T) \cdot f(L) \cdot f(N)$ $DR = DR_1 \cdot \theta_1^{T-20} + DR_2$ $ST = SV/Z$ $f(T) = \theta_1^{T-20}$ $f(L) = \frac{2.718}{k_e \cdot Z} \cdot f_d \cdot [\exp\{-\frac{I_0}{I_k} \cdot \exp(-k_e \cdot Z)\} - \exp(-\frac{I_0}{I_k})]$ $f(N) = \text{Min}(\frac{DIN}{K_{mN} + DIN}, \frac{DIP}{K_{mP} + DIP})$
Nitrogen	$\frac{dN_1}{dt} = \alpha_N \cdot DR \cdot A \cdot f_{N1} - (k_{N1}(T) + S_{N1}/Z) \cdot N_1$ $\frac{dN_2}{dt} = \alpha_N \cdot DR \cdot A \cdot (1 - f_{N1}) + k_{N1}(T) \cdot N_1 + \frac{1}{1,000} \cdot r_N(T)/Z \cdot f_{rN} - \alpha_N \cdot GR \cdot A \cdot a_1 - k_{N2}(T) \cdot N_2$ $\frac{dN_3}{dt} = k_{N2}(T) \cdot N_2 - k_{N3}(T) \cdot N_3$ $\frac{dN_4}{dt} = -\alpha_N \cdot GR \cdot A \cdot (1 - a_1) + k_{N3}(T) \cdot N_3$
Phosphorous	$\frac{dP_1}{dt} = \alpha_P \cdot DR \cdot A \cdot f_{P1} - (k_{P1}(T) + S_{P1}/Z) \cdot P_1$ $\frac{dP_2}{dt} = \alpha_P \cdot DR \cdot A \cdot (1 - f_{P1}) + k_{P1}(T) \cdot P_1 + \frac{1}{1,000} \cdot r_P(T)/Z \cdot f_{rP} - \alpha_P \cdot GR \cdot A$
BOD	$\frac{dB}{dt} = \alpha_c \cdot DR \cdot A - k_1(T) \cdot B - S_B/Z \cdot B$
DO	$\frac{dO}{dt} = k_s(T)/Z \cdot (O_s - O) + \beta_g \cdot GR \cdot A - \beta_r \cdot DR \cdot A - k_1(T) \cdot B - 3.43 \cdot k_{N2}(T) \cdot N_2 - 1.14 \cdot k_{N3}(T) \cdot N_3 - SOD(T)/Z$
	$k_i(T) = k_i(20^{\circ}C) \cdot \theta_i^{T-20}$

표 2. Characteristics of Asan reservoir

Items	Descriptions
Watershed area	1,634.5km ²
Full water surface area	28.0km ²
Total Capacity	142 × 10 ⁶ m ³
Flood water level	+ 4.5m
Management water level	+ 2.5m
Sea-dike length	2,564m
elevation	8.5m
max. height	17m
sluice gate length	105m
sill elevation	- 3.0m (10 gates)
	- 4.0m (2 gates)

3.2.3 오염원 조사

유역의 발생오염부하량은 유입하천별 소유역(진위천 유역, 안성천 유역, 호인접유역)으로 구분하여 인구, 토지이용 및 가축사육 현황과 공장폐수 배출 현황⁽⁵⁾을 조사하여 BOD, T-N, T-P에 대해 인구, 토지이용, 가축의 경우 표 3의 원단위를, 공장폐수의 경우 각 수계별 방류수 수질기준을 고려하여 산출하였다.

또한 유입하천의 유량과 수질을 조사하여 월별 유출율을 구하고 여기서 구한 유출율을 다른 자료⁽⁶⁾와 비교 분석하여 계절별 유출율을 구한 후 계절별 유출율에 발생부하량을 곱해서 유출오염부하량을 산출하였다.

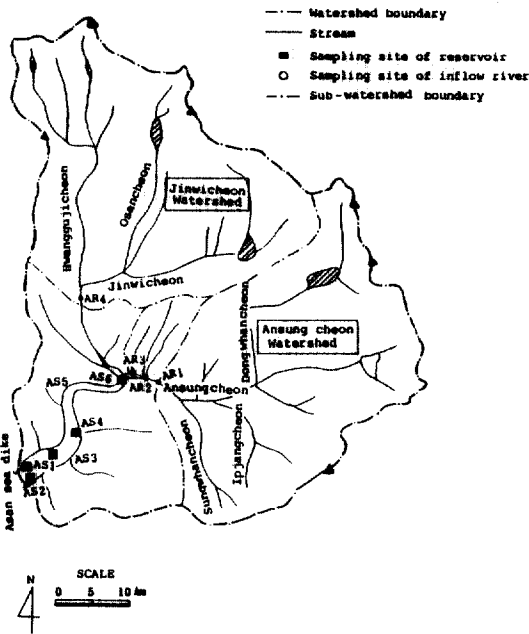


그림 4. Sampling sites of reservoir and inflow rivers

표 3. Unit loadings from various sources of pollution

Item	Population (g/man/day)		Livestock (g/head/day)			Land use (kg/m ² /day)		
	Urban	Rural	Cattle	Pig	Chick	Pad.	Upland	Others
BOD	50.0	44.0	640	125	12.5	5.12	7.10	0.96
T-P	1.9	1.9	72	16	1.4	1.20	0.06	-
T-N	10.8	10.8	128	20	1.5	4.35	0.25	-

4. 연구 결과 및 고찰

4.1 수리·수문 특성

4.1.1 호류분석

아산호의 호류측정은 배수갑문이 닫혀 있는 경우에 실측한 것으로 홍수기를 제외한 평수기와 갈수기를 기준한 것이다. 측정된 호류의 유향과 유속분포를 분석한 결과 호류는 바람에 의하여 발생하는 취송류로서 풍속이 2.0-2.5m/sec 이상이면 파의 형성과 함께 취송류가 발생되며, 풍속이 6.0-7.0m/sec 이상이면 흰물결이 조금씩 보이기 시작하였다. 호 유속은 0.03-0.15m/sec 정도이었으며 측정 위치의 수심과 취송거리 및 인접 호안과의 거리, 풍향 등에 따라 차이가 있음을 확인하였다. 또한 취송류 유속의 수직분포는 수표면으로부터 수심

1-2m/sec 사이에서 상층순류, 하층역류 현상을 나타내어 취송류에 의하여 순환호류가 발생되고 있음을 확인할 수 있었다.

4.1.2 물수지 분석

담수호의 저수량 변화는 하천유입수, 생활하수, 산업배수 등의 유입량과 배수갑문을 통하여 배출되는 방류량, 농업, 공업 및 생활용수 등으로 이용되는 양수량, 호수면 증발에 의한 증발량, 방조제와 호안에서의 유입, 유출량에 의해 변화된다.

1985년 1월-1988년 9월 사이의 4개년간 아산호의 유입, 유출량을 조사 분석한 결과 4개년 전체 유입량은 4551 억톤으로 나타났으며, 방류량, 증발량, 양수량 등 호로부터 유출량은 유입량의 94%인 4259억톤으로 재이용량을 고려할때 침투량은 약 10%로 추정된다. 또한 양수량은 년평균 1.44억톤 정도이며, 공업용수 사용량은 연간 5.4백만톤으로 아산호유입량의 약 0.5%를 차지하고 있었다.

한편 아산호의 수질예측을 위해 호의 수위, 양수량, 방류량 등을 추정할 목적으로 실측자료를 기초로 호 및 하천인자, 유역인자, 관개인자, 기상인자 등을 입력자료로 하는 물수지모형을 적용한 결과 계산된 순별 실측치와 모의발생치 간의 수위와 방류량을 비교하면 그림 5, 6과 같다.

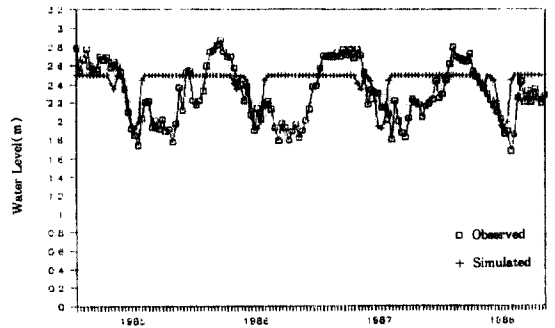


그림 5. Comparison of measured and simulated water level of Asan reservoir

그림 5, 6에서 실측치와 계산치를 1986년을 기준으로 비교하면 상대오차가 평균수위는 3.3-7.3%로 양호하였으며, 방류량은 -27.0~14.7%로써 한발이 극심했던 1988년을 포함하더라도 담수호에 주어지는 외적 요인에 비해 적은 오차를 보이고 있어 물수지모형을 적용할 때 비교적 안정된 물수지 예측이 가

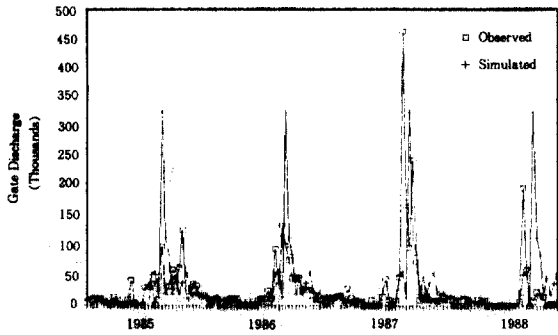


그림 6. Comparison of measured and simulated gate discharge of Asan reservoir

능할 것으로 평가되었다.

4.2 수질 평가

4.2.1. 유입하천의 수질

4월에서 10월 사이에 걸쳐 조사한 각 측정지점별 3개년 평균 수질의 농도분포를 살펴보면, 수온은 17.5-19.6°C, pH는 6.9-7.2, DO는 2.6-7.1mg/L, BOD는 9.1-19.8mg/L, SS는 24.1-39.2mg/L, T-P는 0.369-0.781 mg/L, PO₄-P는 0.125-0.503mg/L, T-N은 2.932-5.086 mg/L, NH₃-N은 1.039-2.592mg/L, NO₂-N은 0.512-0.855mg/L로서 수온과 pH를 제외하고는 최고 최저비가 1.7-4.0배의 큰 차이를 보이고 있다. 이중 PO₄-P와 NH₃-N은 각각 4.0, 2.5배로 계절별 변동이 큰 것으로 나타났다. 또한 DO와 pH를 제외하면, 연평균 수질이 농업용수로 이용할 정도인 IV등급 수역에 속하고 있었다. 지점별로는 공장과 인구가 밀집되어 있는 원곡천(AR 2 지점)과 도일천(AR 3 지점)의 수질이 가장 나쁘고, 진위천(AR 4 지점), 안성천(AR 1 지점)의 순으로 공장 밀집지역과 도시지역의 하·폐수처리가 시급하다고 사료된다. 또한 부영양화의 유발물질인 N과 P의 농도가 호의 농도보다 대체로 높은 것으로 나타나 아산호의 부영양화가 유입하천에 의해 심화되고 있음을 알 수 있었다.

4.2.2 아산호의 수질

각 측정지점별 평균농도 분포를 보면 수온이 20.1-21.1°C, pH가 6.6-7.7, DO가 5.6-7.6mg/L, 염도(Salinity)가 254-439mg/L, BOD가 6.7-12.7mg/L, SS가 17.1-38.3mg/L, T-P가 0.173-0.330mg/L, PO₄-P가 0.067-0.111mg/L, T-N이 2.157-3.613mg/L, NH₃-N이 0.732-1.144mg/L, NO₂-N이 0.327-0.583mg/L, NO₃-N이

0.425-0.694mg/L로서 호소수질등급 IV-V등급에 속하는 수질로 농업용수로도 부적합한 것으로 평가되었다. 지점별 분포로는 수온, pH, DO는 전수역이 균등하였으나 그 이외의 수질은 대체로 호 상류부로 갈수록 나빠지는 경향을 보이고 있다. BOD, T-P, T-N에 대한 변화추세를 보면 그림 7에서 보는 바와 같이 봄철부터 농도가 증가하다가, 장마가 지난 7, 8월 경에 일시 낮아지고 다시 가을철까지 증가하는 추세를 보이고 있다.

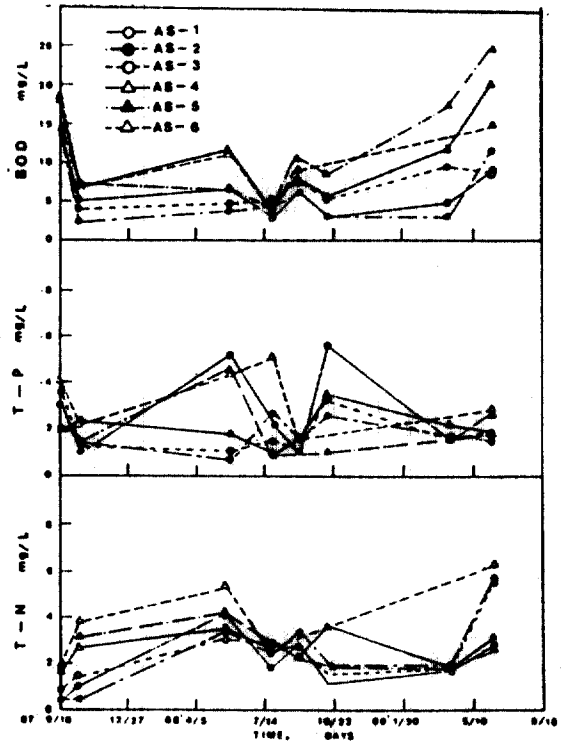


그림 7. Water quality distribution of Asanreservoir at each sampling site

또한 식물성 플랑크톤의 농도를 대표하는 Chlorophyll-a 농도는 평균 24.04mg/m³으로서 호 상류부로 갈수록 높아지는 경향을 보이고 있으며, 봄철에는 낮다가 차차 높아져 가을철에 최대농도를 나타내는 경향을 보였다. 특히 늦은 여름철에 남조류에 의한 수화현상(algal blooming)이 빈번히 관측되었으며, 조류의 우점종으로서 오수성 조류인 Spirogyra, Chlorella, Oscillatoria, Microcystis 등이 다량 출현하고 있어 전형적인 부영양화호의 특

성을 보였다.

투명도(secchi disc depth)도 지점에 따라 0.45-0.64m로 낮은 값을 보였다. 한편 호의 영양상태를 나타내는 지표로서 Forsberg와 Ryding⁽¹⁷⁾의 영양염류에 의한 분류와 Carlson지수(index)⁽¹⁸⁾에 의하여 아산호 수질을 평가하면 모두 부영양화 상태가 심화되어 있는 것으로, 통계적 모형인 Vollenweider 모형⁽¹⁹⁾과 Dillon모형⁽²⁰⁾에 의해서도 부영양 상태로 호의 수질이 매우 오염되어 있는 것으로 평가되어 이에 대한 대책이 시급한 것으로 사료된다.

4.3 오염원 현황

아산호 유역에서 발생하는 총 발생 오염부하량은 1987년 기준 BOD는 약 181톤/일, T-N은 약 36톤/일, T-P는 약 16톤/일로서 진위천 유역에서 발생하는 오염부하량이 가장 많고 안성천 및 호인접유역의 순이었다. 또한 오염원별 기여율을 보면 가축에 의한 발생량이 BOD의 경우 64%로 가장 높고, 다음이 인구 28%, 공장 5%, 토지 3%의 순으로 T-N, T-P의 경우도 같은 경향을 보였다. 이처럼 가축분뇨에 의한 발생량이 높은 것은 아산호 유역내에 대·소규모의 축산단지가 많이 산재해 있고 가축분뇨의 처리가 제대로 되지 않는 데에 있다고 판단된다.

평균 유출오염부하량은 BOD의 경우 21.7톤/일, T-N이 7.1톤/일, T-P가 0.58톤/일이며, 이때 평균 유출율은 각각 14%, 22%, 4%로서 질소의 유출률이 가장 높았다. 계절별 유출을 변화를 보면 그림 8에서와 같이 봄부터 증가되기 시작한 유출율은 6-8월 경에 가장 높았다고 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 여름철에 높은 유출율을 보인 것은 강우로 인한 유량의 증가와 유량증가에 따라 수로유속이 커져 퇴적물의 부상이 원인이 있다고 사료된다. 또한 질소의 유출율이 높은 것은 농경지와 가축에 의한 영향일 것으로 생각된다.

4.4 Multiple Box모형에 의한 수질예측

4.4.1 모형의 적용

(1) 입력자료

입력자료는 크게 기상자료, 수문자료와 수질자료로 구분된다. 기상자료는 아산관측소와 수원측후소의 자료를 이용하여 강수량, 일사량, 운량, 풍속, 상대습도에 대한 순별 평균으로 입력하였다. 수문자료는 호수위, 배수갑문 방류량, 양수량, 하천유입량

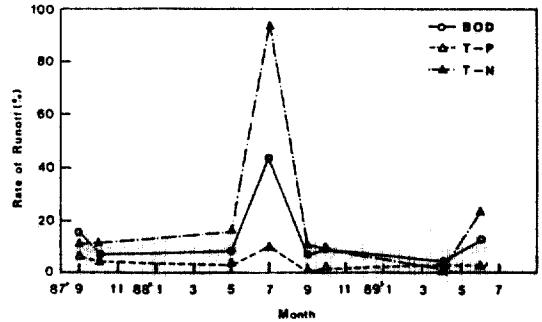


그림 8. Seasonal variations of stream runoff rate of BOD, T-N, and T-P

및 황유입량 등이다. 수위자료는 운전기록자료를 기초로 하여 산출하였고, 유입량은 USDAHL-74/SNUA모형을 이용하였으며, 그 결과를 순별로 입력하였다.

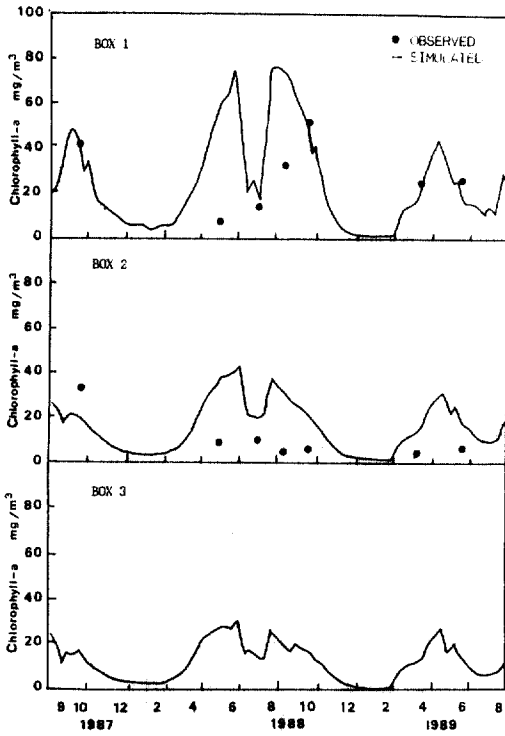
수질자료는 초기 수질농도와 유역에서의 오염부하량으로 수질농도 초기값은 1987년 9월에 실측한 자료를 이용하였으며 유출부하량은 발생부하량에 계절별 유출율을 입력하여 계산토록 하였다.

또한 모형에 사용된 각 수질항목별 파라메타들은 현장실측 또는 문헌^(21,22)에서 선정하고 모형보정을 통해 최적치를 구하였다.

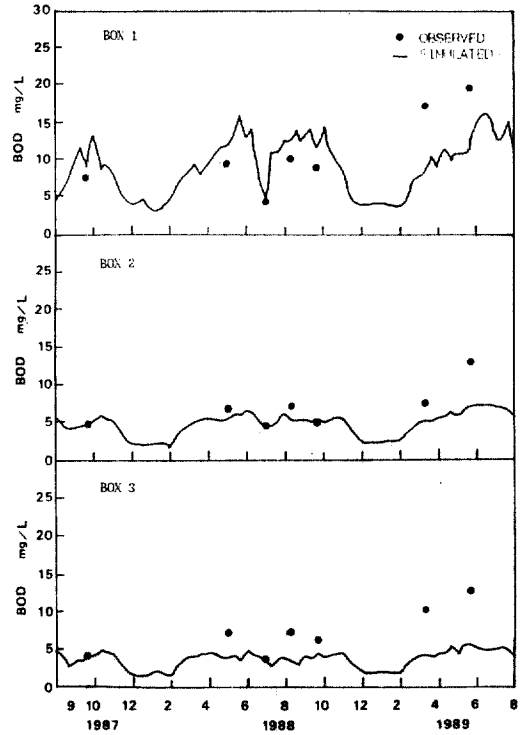
(2) 모형의 적용결과

Chlorophyll-a, BOD, PO₄-P, T-P, NH₃-N, T-N에 대한 모형적용결과 계산치와 실측치를 비교한 결과를 그림 9에 나타내었다. 계산치가 실측치의 변화추세를 잘 나타내고 있는가를 파악하기 위해 원점을 지나는 회귀식으로부터 BOX별 상관계수를 산출한 결과, Chlorophyll-a는 0.63-0.77, BOD는 0.92-0.96, PO₄-P는 0.79-0.88, T-P는 0.88-0.98, NH₃-N은 0.49-0.69, T-N은 0.88-0.91이었다. Chlorophyll-a 및 NH₃-N을 제외하고는 비교적 양호하여 수질변화 추세를 잘 따르고 있는 것으로 평가되었다.

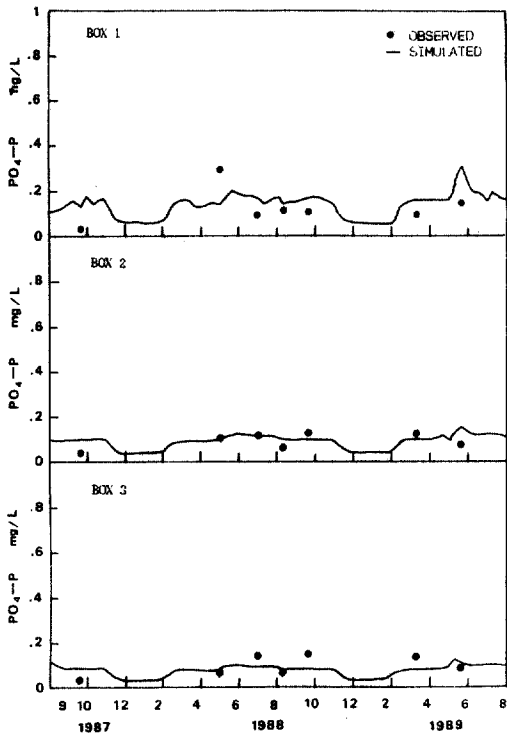
계산된 수질 경향을 보면 Chlorophyll-a, BOD, PO₄-P, T-P는 봄부터 증가하기 시작하여 6월과 9월에 최고 농도를 나타내다, 늦가을부터는 크게 농도가 감소하는 경향을 보이고 있으며 특히 Chlorophyll-a와 BOD는 장마철인 7, 8월 경에 낮은 값을 나타내어 실측자료와 비슷한 추세를 나



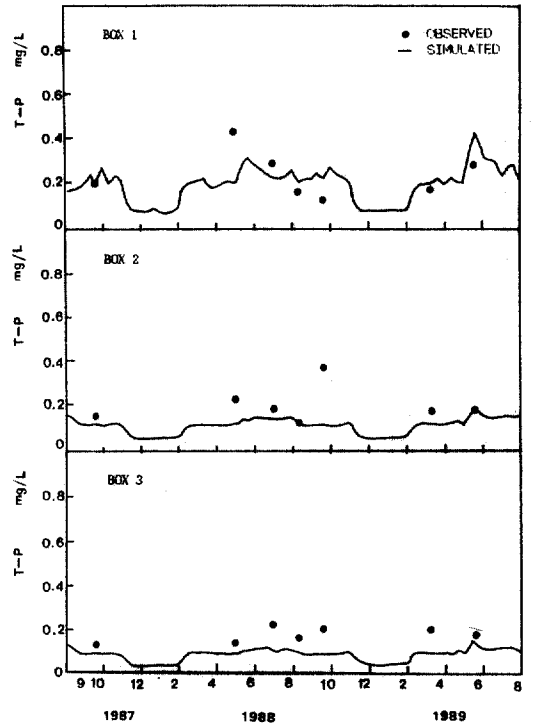
(a) Chlorophyll-a



(b) BOD



(c) PO₄-P



(d) T-P

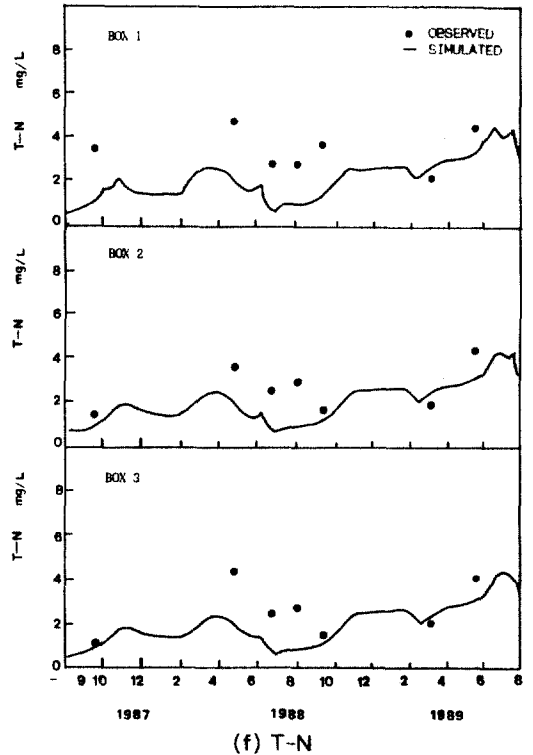
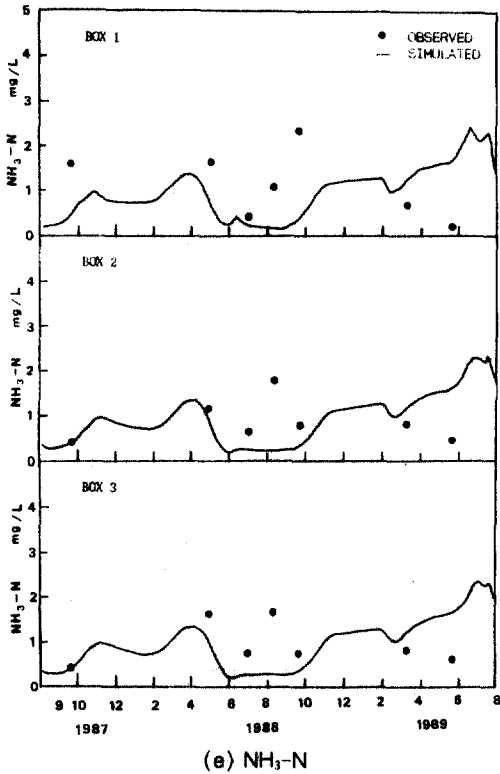


그림 9. Comparisons between observed and simulated values of chlorophyll-a, BOD, PO₄-P, T-P, NH₃-N, T-N in each box

타내었다. NH₃-N, T-N은 겨울철에 높은 값을 나타낸 반면 여름철에는 다소 낮은 값을 나타내어 식물성플랑크톤에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다.

1988년에 계산된 월별 평균 수질범위를 보면, Chlorophyll-a의 경우 4.44-40.95mg/m³, BOD는 2.3-10.4mg/L T-P의 경우 0.047-0.258mg/L, T-N의 경우 0.550-2.180mg/L로서 계절적인 변화폭이 큰 것으로 계산되었다.

(3) 예민도 분석

모형에 사용된 60여개의 계수들 중 온도보정계수를 제외한 46개의 중요계수들을 대상으로 실시하였다. 방법은 모형의 보정을 위하여 조정된 계수값을 10%씩 증감시켜 계산한 값을 변화시키지 않았을 때의 값과 비교하였다. 이 결과 10개의 계수가 민감한 반응을 보였고, 그 외의 계수들은 미소한 반응 또는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 주요 항목별 영향인자들을 보면, Chlorophyll-a는 20°C에서의 조류의 최대성장속도가, BOD는

BOD분해속도, PO₄-P와 T-P는 조류의 최대성장속도와 유기인의 무기화율, NH₃-N, T-N는 조류의 최대성장속도와 Chlorophyll-a의 질소화율이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 대체로 조류의 최대성장속도가 거의 모든 수질항목에 영향을 주고 있는 것은 본 모형이 Chlorophyll-a를 중심으로 구성한 것에 원인이 있는 것으로 사료된다.

4.4.2 장래 수질예측

(1) 입력자료

수질예측을 위한 입력자료 중 수문자료는 USDAHL-74/SNUA모형과 물수지모형을 이용하여 1979-1989년의 10년간 유출자료를 분석한 결과치의 평균과 가장 가까운 년도인 1986년 자료를 이용하였으며, 유출부하량은 장래 발생부하량의 년도별 증가량 산출식에 계절별 유출율을 적용하여 산출하였다.

(2) 예측결과 및 평가

아산호가 현 수준에서 오염부하량만 증가된다고

가정하고 모형에 의해 1991, 1996, 2001년에 대한 Chlorophyll-a, BOD, T-N, T-P농도의 예측결과를 보면 1991년에 BOD는 2.4 - 26.1 mg/L, Chlorophyll-a는 3.12-88.40mg/m³, T-N은 0.588-4.446mg/L, T-P는 0.036-0.583mg/L 범위이고, 1996년에 BOD는 2.3-33.6mg/L, Chlorophyll-a는 3.12-88.67mg/m³, T-N은 0.729-6.743mg/L, T-P는 0.040-0.719mg/L 범위이며, 2001년에 BOD는 2.6-36.8mg/L, Chlorophyll-a는 3.12-88.34mg/m³ T-N은 0.988-8.962mg/L, T-P는 0.044-1.134mg/L 범위로 연중 변화폭이 크게 나타났다. 예측치의 수질특성을 보면 실측치와 같이 호상류부(Box 1)로 갈수록 수질이 나빠지는 경향을 보였다. 연중 변화로는 T-N을 제외하고는 겨울철인 1월과 12월에 가장 낮았으며, 여름철인 6-8월에 가장 높은 반면, T-N은 8월에 가장 낮고 7월에 가장 높으며, 8월에 낮은 값을 보인 것은 Chlorophyll-a 성장으로 인한 질소의 소모가 큰 것으로 예측되었다.

연도별 변화추세를 보면, BOD, T-P, T-N은 미래년도로 갈수록 증가하고 있는 반면, Chlorophyll-a농도는 증가율이 둔화되고 있는 경향을 보여, 식물성플랑크톤이 N, P와 같은 영양염류보다는 광도, 수온 등 외적 요인에 제한을 받고 있는 것으로 평가되었다.

또한 호소수질등급별로 비교하면 1991년에는 V 등급정도의 수질이나 1996년 이후부터는 V 등급이하의 수질로 농업용수로도 이용이 불가할 것으로 평가되었다.

4.5 수질개선 방안

하천 말단에 설치된 하구 담수호는 그 지리적 위치상 수질이 악화되기 쉬운 조건을 가지고 있어 호수질보전을 위한 관리대책 역시 어려운 문제를 안고 있다. 아산호는 이미 수질평가결과 부영양화가 심화되고 있으며, 따라서 수질개선에 대한 종합적인 대책 수립이 시급한 실정에 있다.

아산호 수질이 유역에서 유출되는 오염부하량에 영향을 받는다는 점을 감안할 때 유역에서 현실적으로 적용 가능한 오염부하량 저감방안별(재래식 하수처리, 고도하수처리, 무린세제 도입, 축산폐수 10% 및 20% 감축) 수질개선효과를 파악하기 위해 2001년에 각 방안별 연평균 아산호의 수질변화를

Chlorophyll-a, BOD, T-P, T-N에 대해 예측한 결과는 표 4와 같다.

이 결과를 비교하면, Chlorophyll-a의 경우 무린세제 도입시, BOD의 경우 재래식 및 고도하수처리시, T-P의 경우 축산폐수 20% 저감시, T-N의 경우 고도하수처리시 수질개선효과가 가장 큰 것으로 평가되었다. 그러나 어느 경우에 있어서도 아산호의 수질은 2001년에는 V등급을 벗어나지 못하고 있어 이수목적에 합당한 농업용수로 이용하기 위해서는 추가로 오염원의 규제가 필요하다.

따라서 이상의 여러 오염원 감축방안에 대한 수질 결과를 비교 분석하면 어느 한 오염원만 통제해서는 호수질 개선효과가 크지 않으므로 여러 오염원을 일정수준 지속적이고 종합적으로 감축시켜야만 호수질 개선효과가 높을 것으로 사료된다.

표 4. Comparison of treatment alternatives for water quality improvement in Asan reservoir on the basis of 2001 year

Item	Unit	Alternative*				
		I	II	III	IV	V
Chl-a	mg/m ³	17.75	18.57	17.62	18.46	21.07
BOD	mg/L	9.0	9.0	10.0	9.9	9.4
T-P	mg/L	0.190	0.179	0.192	0.180	0.160
T-N	mg/L	2.654	2.244	2.947	2.672	2.281

- *Alternative I : Traditional Sewage Treatment
- II : Advanced Sewage Treatment
- III : Non-phosphorous Detergent
- IV : 10% Reduction of Livestock Waste
- V : 20% Reduction of Livestock Waste

9. 결 론

1987-1989년 동안 현장조사와 담수호 수질 예측모형을 통한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 하천말단에 위치한 하구 담수호인 아산호는 그 지리적 위치상 부영양화가 심화되어 농업용수 수준인 IV등급 이하의 수질을 나타내었다.
- (2) 담수호의 수질개선을 위해서는 호의 수질변화를 예측하고, 호수질에 악영향을 미치는 요인을 파악하여 담수호 개발단계에서부터 수질관리 대책

을 수립할 필요가 있다. 본 연구에서 개발한 수질 모형을 하산호에 적용한 결과 담수호의 중·장기 수질예측 모형으로 이용가능할 것으로 평가되었다.

(3) 수질관리를 위해서는 여러 오염원을 종합적으로 관리하여야만 용수수질에 합당한 수질을 유지할 수 있을 것으로 판단되며, 또한 부영양화의 원 인물질인 N, P를 통제하기 위해 고도하수처리, 무 린세제의 도입, 농업배수에 대한 비료유출방지책과 적정시비법 점검, 축산폐수에 대한 농지환원과 유 역의 사육 두수 적정화 등의 조치가 있어야 할 것 으로 판단되며, 이를 보증할 만한 제도적 확립이 요청된다.

기 호

- A : phytoplankton conc., mg chl-a/m³
- N₁ : organic-N conc., mg/L
- N₂ : ammonia conc., mg/L
- N₃ : nitrite conc., mg/L
- N₄ : nitrate conc., mg/L
- P₁ : organic-P conc., mg/L
- P₂ : phosphate conc., mg/L
- B : BOD conc., mg/L
- O : DO conc., mg/L
- O_s : saturation DO conc., mg/L
- GR : gross rate, 1/d
- DR₁ : respiration rate, 1/d
- DR₂ : rate of nonpredatory mortality, 1/d
- DG : loss rate due to grazing, 1/d
- ST : settling rate of phytoplankton, 1/d
- SV : settling velocity of phytoplankton, m/d
- S_{N1} : " organic-N m/d
- S_{P1} : " organic-P, m/d
- S_B : " BOD, m/d
- I₀ : light intensity at water surface, ly/d
- I_K : optimum light intensity, ly/d
- f_d : fraction of daylight
- f_{N1} : fraction of org.-N to T-N produced by respiration and nonpredatory mortality of phytoplankton
- f_{P1} : fraction of org.-P to T-P produced by respiration and nonpredatory mortality of phytoplankton.
- f_N : release adjustment factor of nitrogen.

- f_{IP} : " of phosphorus.
- D_{IN} : conc. of dissolved inorganic nitrogen, mg/L
- D_{IP} : " phosphorus, mg/L
- K_{MN} : half-saturation constant for D_{IN}, mg/L
- K_{MP} : " for D_{IP}, mg/L
- a_f : ammonia preference factor
- α_N : nitrogen composition of phytoplankton biomass, mg N/mg chl-a
- α_P : phosphorus composition of phytoplankton biomass, mg P/mg chl-a
- α_C : carbon composition of phytoplankton biomass, mg C/mg chl-a
- β_g : oxygen produced per unit of phytoplankton biomass, mg O₂/mg chl-a
- β_r : oxygen consumed per unit of phytoplankton biomass, mg O₂/mg chl-a
- r_N(T) : release rate of ammonia at T°C, mg N/m³/d
- r_P(T) : " phosphate at T°C, mg P/m³/d
- k_e : extinction coeff., 1/m
- k_{N1} : ammonification rate of organic-N at T°C, 1/d
- k_{N2} : nitrification rate of ammonia at T°C, 1/d
- k_{N3} : " of nitrite at T°C, 1/d
- k_{P1}(T) : mineralization of organic-P at T°C, 1/d
- k₁(T) : BOD decay rate at T°C, 1/d
- k_a(T) : surface transfer coeff. of oxygen, m/d
- θ_i : temperature adjustment coeff.
- SOD(T) : sediment oxygen demand at T°C, mg/L
- t : time
- T : temperature, °C
- Z : water depth, m

참 고 문 헌

1. 권순국, 유명진, "담수호의 환경오염 및 부영양화 방지대책 수립(I)-(III)", 농업진흥공사, 1987-1989.
2. 농업진흥공사, 농업용수 수질오염 조사 보고서, 1982-1989.
3. 환경청, 한국 환경 연감, 제2호, 1989, pp. 344-347.
4. 김동균의 3인, "호소수의 부영양화 현상에 관한 연구", 국립환경연구소보(4), 1982, pp. 147-154.
5. 김좌관, "낙동강 하구언호의 부영양화에 관한 연구", 서울대 환경대학원 석사학위 논문, 1988.

6. 정태명, "WQRRS모형을 이용한 장래수질 관리방안에 관한 연구", 서울시립대 대학원 환경공학과 석사학위논문, 1988.
7. 임종완, "담수호 Multiple Box 수질모형의 개발과 적용", 서울대 대학원 농공학과 박사학위 논문, 1989.
8. UNEP, *Eutrophication and Rehabilitation of surface Waters, Development and Management Parts*, Pergamon Press, 1978, pp. 811-814.
9. OECD, *Eutrophication of Water Monitoring, Assessment and Control*, 1982, pp. 17-27.
10. Muraoka, K., Fukushima, T., "Hydrological Considerations on Box Model", *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. stud. Japan* No. 54, 1984, pp. 31-51.
11. Stumm, W., and Morgan J.J, *Aquatic chemistry*, Wiley Interscience, 1981, pp. 780-781.
12. Fisher, H.B., et al., *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press, 1979, pp. 146-228.
13. Wetzel, R. G, *Limnology*, 2nd ed. CBS College publishing, 1983, pp. 66-67.
14. 건설부, 한국수문조사년보, 1986, pp. 469-474.
15. 환경청, '86 폐수배출업체 명단, 1987.
16. 환경청, 안성천 정화사업 기본계획 보고서, 1987.
17. Forsberg, C., Ryding S.O., "Eutrophication Parameters and Trophic State Indices in 30 Swedish Waste-receiving Lakes", *Arch. Hydrobiol.*, Vol. 89, 1980, pp. 189-207.
18. Carlson, R. E, "A trophic state index for lakes", *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 22(2), 1977, pp. 361-369.
19. Vollenweider, R.A., "Input-Output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology", *Schweigenchen für hydrobiologie*, Vol. 37, 1975, pp. 53-84.
20. Dillon, P.J. and Rigler, F.H, "A test of nutrient budget model predicting the phosphorus concentration in lake water", *J. of The Fisheries Research Board of Canada*, Vol. 33, 1976, pp. 1742-1750.
21. Thomas O. Barnwell, Jr., et al, "Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface water quality modeling", 2nd ed., *US. EPA*, Athens, Georgia /600/3-85/040, 1985, pp. 244-365.
22. Matsuoka Y., "An Eutrophication Model of lake Kasumigaura", *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. Japan*, No. 54, 1984, pp. 90-128.

(接受: 1990. 8. 7)