

호소수질정화공법의 평가를 위한 수질모형의 개발 및 적용

Development and Application of a Water Quality Model to Assess Water Purification Techniques for Lakes and Reservoirs

박 병 훈* · 권 순 국** · 장 정 렬***
Park, Byung Heun · Kwun, Soon Kuk · Jang, Jeong Ryul

Abstract

Excessive outflow of pollutant loads resulting from rapid industrialization has unbalanced the water ecosystem, deteriorating the water quality environment severely. Therefore, measures for improving the water quality are necessary to maintain clean reservoir water and restore water-friendly spaces.

A water quality model which is capable of simulating daily reservoir water quality was developed. The model had been applied to Masan reservoir and Wanggung reservoir in Korea. The model appeared to be satisfactory in representing the trend of water quality variations by comparing measured and simulated results.

The model had been also applied to assess water purification techniques such as dredged pool, floating island and vegetation purification system. The model was considered to assess the effect of water purification techniques on reservoir water quality improvement.

The results of water quality simulation for lake water purification techniques showed that a large facility would be needed to meet the targeted water quality of the reservoir when only one technique is applied. To effectively improve the quality of the polluted reservoir water, it is therefore recommended that pollutant sources should first be controlled, and a combination of the water purification techniques applied to make the utmost use of their secondary effects such as conservation of the reservoir volume capacity, establishment of a recreation space, promotion of bio-diversity, and improvement of the lake landscape.

I. 서 론

최근 고도의 경제발전에 따른 오염부하량의 과

도한 배출은 자연의 환경용량을 초과하고 수역의 생태계 균형을 파괴시켜 수질환경의 현저한 악화를 가져왔다. 이에 따라 수질개선을 위한 노력이

* 환경관리공단 유역관리처

**서울대학교 농업생명과학대학

***농업기반공사 용수관리처

키워드 : 수질예측, 수질모형, 수질개선대책,
수질개선공법, 효과분석

다각도로 진행되고 있다. 이러한 수질개선대책을 수립하고, 대책에 따른 효과를 분석하기 위해서는 수질예측모형이 필요하다.

일반적으로 호소 수질예측에 많이 활용되고 있는 WQRRS, MINLAKE, WASP5 등의 생태계 모형들은 수심이 깊고, 체류시간이 긴 자연호수를 대상으로 개발되었다. 이 모형들은 성층현상으로 인한 수심별 수질차이를 크게 고려하고, 긴 체류시간 동안 발생하는 복잡한 생태적 반응기작을 중요시 하는 모형이다. 이들 모형의 입력자료인 각종 생태계 계수 값들은 실측된 자료가 거의 없어 모형의 예측결과가 비교적 부정확하고 보정 및 검정작업이 어려운 점이 있다.²⁾

현재 많이 이용되고 있는 대부분의 모형에서 유기물의 예측은 WASP5는 CBOD, WQRRS는 BOD 등으로 되어 있으나,^{20,21)} 수질개선대책에 활용될 수 있는 모형은 수질정화기본법에서 규정하고 있는 COD를 모의할 수 있어야 수질개선대책에 따른 목표수질 달성여부를 쉽게 판단할 수 있을 것으로 생각된다.

관개용 저수지는 대부분 수심이 10m 이하로 성층화 정도가 크지 않으며, 저수지의 설치 목적상 홍수기에 물을 저류했다가 관개기에 거의 방류되는 형태를 취하므로 체류시간이 자연호수에 비해 매우 짧은 특성을 가지고 있다.^{5,13)}

호소 수질개선대책은 크게 유입하천대책과 호소내 대책으로 대별 될 수 있으며,¹¹⁾ 이들은 수질정화공법의 위치, 종류 등에 따라 호소 수질에 미치는 영향은 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 우리 나라 관개용 저수지의 특성을 감안하여 복잡한 생태계 모형을 단순화시켜 많은 계수들의 입력에 따른 부정확성을 피할 수 있고, 수질정화공법의 종류와 위치 등에 따른 영향을 잘 예측할 수 있는 수질예측모형을 개발하여 호소 수질개선대책 수립에 활용하고자 한다.

II. 모형의 구성

1. 가정 및 조건

호소의 수질예측모형은 공간을 임의로 분할하여 각 공간에 대해 평균화를 행하는 box 모형, 공간분포를 편미분방정식으로 취하여 유한차분법, 유한요소법 등의 이산화방법으로 해석하는 방법, 정상상태를 가정하여 공간변화를 상미분방정식으로 해석하는 모형으로 대별할 수 있다. 그 중 box 모형은 호를 하나의 완전혼합조로 가정하는 one box 모형과 성층에 따라 상·하층으로 구분하는 two box 모형, 그리고 호의 형태, 수리, 수문특성에 따라 여러 개의 box로 분할하는 multiple box로 나눌 수 있다.¹⁾

본 연구에서 개발하고자 하는 모형은 관개용 저수지의 수질예측과 수질개선대책의 수립에 활용하기 위한 것으로 저수지의 특성에 따라 여러 개의 box로 분할하고, 각 box에서의 일별 평균수질을 계산하도록 하였다.

2. 기본방정식

가. 물수지 방정식

저수지 물수지는 유입·유출수량을 주어진 시간 단위별로 저수량 또는 저수지 수위를 추적하기 위해 사용되는데, 이는 연속방정식에 의해 식(1)과 같이 표시될 수 있다.²²⁾

$$V_t = V_{t-1} + Q_{in} + P_t - (Q_{out} + E_t + L_t) \dots \dots \dots (1)$$

여기서,

V_t : t 일의 저수량	Q_{in} : 유입량
P_t : 수면강수량	Q_{out} : 월류 및 방류량
E_t : 수면증발량	L_t : 기타 손실량

위의 식에서 지하수 유입량, 지중 침투량 및 제방침투량은 실측이 거의 불가능한 요소들로서 양이 매우 적거나 단기간의 물수지에 영향을 크게 미치지 않으므로 기타 손실량(other loss)을 도입

하여 black box로 처리한다.^{3,4)}

나. 기본 물질수지식

box i에 대한 물질수지식은 연속형태의 이류분산방정식(advection-diffusion equation)으로부터 각 box의 평균화에 집중상수화한 이산형태의 방정식으로 나타내면 식 (2)와 같다.^{1,18)}

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = \sum_j [(Q_{ij} C_j - Q_{ji} C_i) + \frac{E_{ij} A_{ij}}{l_{ij}} \times (C_j - C_i)] + \sum_m W_{im} + \sum_n S_{in} \dots\dots\dots(2)$$

여기서, V_i : box i의 체적

- Q_{ij} : box i, j 간의 이류량
- C_i : box i의 평균물질농도, E_{ij} : 확산계수
- A_{ij} : box i, j 간의 경계면적
- l_{ij} : box i, j 간의 중심간 거리
- W_{im} : 외부로부터 box i로 유입되는 부하량
- S_{in} : box i에서 물질의 증감 속도

식(2)에서 첫 번째 항의 첫 부분은 box 간 이류에 의한 물질이동량이며, 두 번째 부분은 box 간 교환유량에 의한 물질교환량을 나타낸다. 세 번째 항은 외부로부터 부하량을 표시하며, 하천으로부터 유입, 횡유입, 강우로부터 유입 등이 포함된다. 첨자 m은 외부 유입부하량의 종류이다. 네 번째

Table 1 Kinetic equations

Components	Basic equations
Phytoplankton	$\frac{dPHYT}{dt} = (GR - DR - ST) \cdot PHYT$ $DR = DR_1 \cdot \theta_i^{T-20} + DR_2$ $ST = SV/Z$ $f(T) = \theta_1^{T-20}$ $GR = GR_{max}(20^\circ C) \cdot f(T) \cdot f(L) \cdot f(N, P)$ $f(L) = \frac{2.718}{K_e \cdot Z} \cdot f_d \cdot \exp\left[-\frac{I_0}{I_k} \cdot \exp(-K_e \cdot Z)\right] - \exp\left(\frac{I_0}{I_k}\right)$ $f(N, P) = \text{Min}\left(\frac{DIN}{K_{nN} + DIN}, \frac{DIP}{K_{mP} + DIP}\right)$
Nitrogen	$\frac{dOrgN}{dt} = \alpha_N \cdot DR \cdot PHYT \cdot f_M - (K_M \cdot \theta_M^{T-20} + S_M/Z) \cdot OrgN$ $\frac{dNH_4}{dt} = \alpha_N \cdot DR \cdot PHYT \cdot (1 - f_M) + K_M \cdot \theta_M^{T-20} \cdot OrgN + \frac{1}{1000} R_{WN}(T) \cdot \frac{A_b}{V_i}$ $- \alpha_N \cdot GR \cdot PHYT \cdot C_{af} - K_{N2} \cdot \theta_{N2}^{T-20} \cdot NH_4$ $\frac{dNO_2}{dt} = K_{N2} \cdot \theta_a^{T-20} \cdot NH_4 - K_{N3} \cdot \theta_{N3}^{T-20} \cdot NO_2$ $\frac{dNO_3}{dt} = -\alpha_N \cdot GR \cdot PHYT \cdot (1 - C_{af}) + K_{N3} \cdot \theta_{N3}^{T-20} \cdot NO_2$
Phosphorus	$\frac{dOrgP}{dt} = \alpha_P \cdot DR \cdot PHYT \cdot f_{p1} - (K_{P1} \cdot \theta_{P1}^{T-20} + S_{P1}/Z) \cdot OrgP$ $\frac{dPO_4}{dt} = \alpha_P \cdot DR \cdot PHYT \cdot (1 - f_{p1}) + K_{P1} \cdot \theta_{P1}^{T-20} \cdot OrgP$ $- S_{P2} \cdot PO_4/Z + \frac{1}{1000} \cdot R_{WP}(T) \cdot A_b/V_i - \alpha_P \cdot GR \cdot PHYT$
COD	$\frac{dCOD}{dt} = \alpha_C \cdot GR \cdot PHYT - K_1 \cdot \theta_C^{T-20} \cdot COD + R_{WC} \cdot \theta_{WC}^{T-20} \cdot A_b/V_i - S_C/Z \cdot COD$
DO	$\frac{dDO}{dt} = K_a \cdot \theta_a^{T-20} (DO_s - DO) - K_C \cdot \theta_C^{T-20} \cdot COD - R_{WD} \cdot \theta_{WD}^{T-20} \cdot A_b/V_i$ $+ A_{op} \cdot GR \cdot PHYT - K_R \cdot \theta_R^{T-20} \cdot PHYT$

항은 box 내에서 물질의 증가 및 감소를 나타내는 것으로 증식, 사멸, 침강, 저니로부터 용출 등이 고려된다. 첨자 n은 box 내에서 물질의 반응식의 종류이다.

다. 수질변화 기본방정식

box 내의 수질은 유입, 유출 및 교환유량에 의한 물질전달 이외에도 침강과 용출, 유기염류의 무기화, 식물성 플랑크톤의 증식과 사멸 등의 작용에 의해 변화된다.^{12,17,20,21)} box 내 수질항목간의 상호관계는 Fig. 1과 같으며, 반응식은 Table 1에 나타내었다.

1) 식물성 플랑크톤(Phytoplankton)

식물성 플랑크톤은 광합성에 의한 성장과 호흡, 자연사, 침강, 동물성 플랑크톤에 의한 포식 등으로

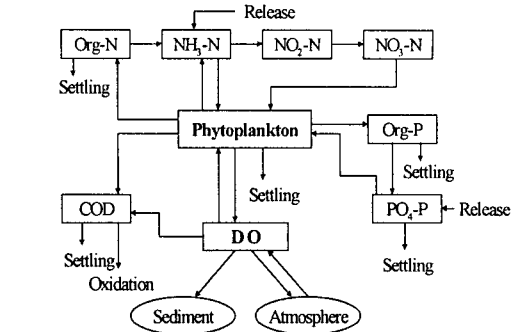


Fig. 1 Interactions of water quality components in reservoirs

로 감소한다. 식물성 플랑크톤의 성장은 수온, 광도, 영양염류 등에 영향을 받게 된다.

식물성 플랑크톤의 침강은 세포의 크기, 밀도,

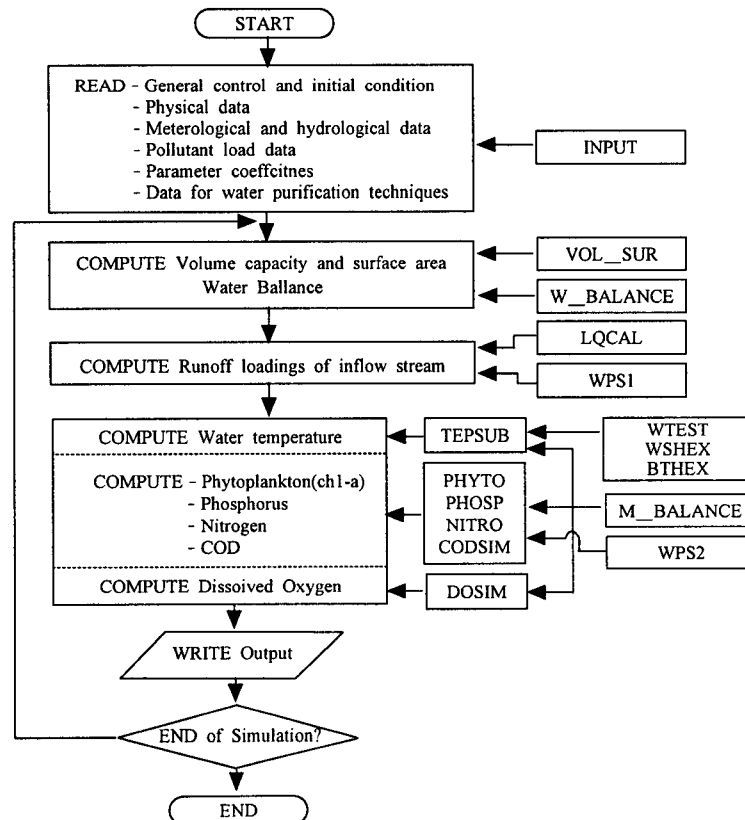


Fig. 2 Flow chart of the computer program

형태, 생리적 상태, 수체의 점성과 밀도에 따라 다르다. 본 연구에서는 침강율을 이용하였으며, 침강율은 식물성 플랑크톤의 농도에 따라 가감 조정토록 하였다.^{14,16)} 식물성 플랑크톤의 농도는 Chl-a 농도로 예측하였다.

2) 질 소

질소는 식물성 플랑크톤의 호흡 및 사멸, 분해에 의해 유기성 질소와 NH₄-N가 증가하고, 성장에 의해 NH₄-N와 NO₃-N가 감소된다. 질산화에 의해 NH₄⁺ → NO₂⁻ → NO₃⁻로 변환되며, 유기질소의 침강과 호저로부터 NH₄⁺의 용출이 일어난다.

3) 인

인은 담수호의 영양상태를 판정하는 주요 요인 중의 하나로 형태에 따라 유기인과 무기인으로 구분되며, 무기인인 PO₄-P는 부영양화의 원인으로 작용하는 예가 많다. 인은 질소의 경우와 같이 식물성 플랑크톤의 광합성에 의해 감소하고, 호흡 및 사멸, 분해에 의해 증가되며, 인의 침강과 무기화, PO₄-P의 용출에 의해 변화된다.

4) 화학적 산소 요구량

COD(chemical oxygen demand)는 저수지의 유기물에 의한 수질 오염을 나타내는 대표적인 지표로서 식물성 플랑크톤의 생성과 저니로부터 용출에 의해 증가되며, 미생물에 의한 유기물의 분해, 침강에 의해 감소된다. 森北(1987)는 호소에서 COD의 예측을 위하여 내부생산에 의한 COD 증가량, COD의 산화, 바닥에서의 용출량을 고려하여 COD 반응식을 구성하였다. 본 연구에서는 森北(1987)가 제안한 COD 반응식에서 침강항을 추가하였다.

5) 용존산소

DO (Dissolved Oxygen)의 방정식은 재폭기, 탈산소작용, 광합성, 호흡작용, 저질의 산소 소모정도 등으로 구성하였다.

3. 모형의 구성

호소 수질의 예측과 수질정화공법의 적용에 따

르는 수질개선효과를 예측하기 위하여 모형은 1개의 주모형(main program)과 16개의 부모형(sub-routine)으로 구성하였다. 모형의 흐름도는 Fig. 2와 같으며, 부모형의 기능에 대해서는 Table 2와 같이 정리하였다.

입력자료로는 초기치 설정값, 각종 상태변수의 대한 기수값, 호의 물리적 형상에 관한 자료, 일별 기상자료, 수문자료(일별 저수지 수위, 일별 유입량), 유입오염부하량 계산을 위한 L-Q식의 계수값, 수질정화공법의 규모와 처리효율에 관한 자료가 요구된다.

모의되는 수질항목은 수온, DO, COD, 질소(Org-N, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, T-N), 인(Org-P, PO₄-P, T-P), Chl-a로서 일별로 예측된다. 또한 수질정화공법의 종류, 위치, 처리효율에

Table 2 List of subroutines and their functions

Name	Functions
BTHEX	Calculate bottom heat exchange for water temperature
CODSIM	Calculate COD
INPUT	Read input data
LQCAL	Calculate runoff loadings of COD, nitrogen and phosphorus from the equation of L-Q
M_BALANCE	Calculate hydrologic mass transfer
NITRO	Calculate Org-N, NH ₄ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, and T-N
DOSIM	Calculate DO
PHOSF	Calculate Org-P, PO ₄ -P, and T-P
PHYTO	Calculate phytoplankton
WPS1	Calculate removed loads by water purification techniques established in inflow stream
WPS2	Calculate removed loads by water purification techniques established in reservoir
TMPSUB	Calculate water temperature
VOL_SUR	Calculate volume capacity and surface area of each box
W_BALANCE	Calculate water balance in each box
WSHEX	Calculate water surface heat exchange for water temperature
WTEST	Calculate rain and inflow temperature

따라 저수지의 수질변화를 예측할 수 있도록 모형을 구성하였다.

III. 모형의 적용

1. 모형의 보정

가. 대상 저수지

본 연구의 대상지는 충남 아산시에 위치한 마산저수지를 선정하였다. 마산저수지는 유역면적 1,776 ha, 관개면적이 566 ha, 만수면적 92 ha, 저수량이 3,037천 m^3 인 중규모 관개용 저수지로 농업용수 수질 측정망에 포함된 저수지의 평균 규모와 비슷하며, 저수지의 수질은 1999년의 경우 COD 6.6~20.5 mg/L, T-N 1.401~5.920 mg/L, T-P 0.094~0.956 mg/L로서 환경정책기본법의 호소수질 환경기준(농업용수) IV등급을 초과하여 수질개선이 필요한 저수지이다.⁶⁾

현재 마산저수지의 유입부는 Fig. 3과 같이 준설되어 저류지 역할을 하고 있다. 준설부의 수질과 저수지 중앙부의 수질 차이가 많이 나기 때문에 모형의 보정을 위한 box의 분할은 Fig. 4와 같이 준설부의 상층과 하층, 저수지 중앙부의 3개 box로 나누어 적용하였다.



Fig. 3 Depth of water in Masan reservoir after dredging during the year of 1996-1997

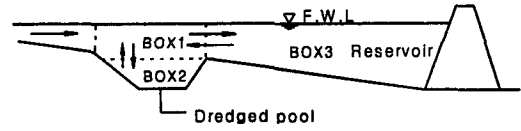


Fig. 4 Segmentation of the reservoir studied for modeling

나. 입력자료

모형의 보정을 위한 입력자료는 본 연구의 대상지인 마산저수지의 1998~1999년(2개년)의 자료를 이용하였다. 모형의 입력자료는 크게 기상자료, 수문자료 및 수질자료로 구분된다.

기상자료 중에서 기온, 강수량, 운량, 풍속, 상대습도는 천안 기상관측소의 일별자료를 이용하였다. 일사량은 서산 기상관측소 자료를 이용하였으며, 일조시간은 월평균에 대한 월별 비율로 입력하였다.

저수지의 유입량은 탱크모형을 이용하여 계산하였다. 탱크모형은 임의의 집수면적을 여러 개의 저류탱크로 가상하여 강우-유출과정을 모형화한 것으로서 하천유출과 관련된 일종의 개념적인 수문모형인 동시에 집중형(lumped) 모형이다.¹⁴⁾ 모형의 보정자료는 1999년에 황산천에 설치된 자동수위계의 수위자료와 수위-유량 관계식과 수위계 수위자료로부터 구한 유량 및 실측한 유량을 이용하여 탱크모형의 매개변수를 보정하였다. 보정된 탱크모형으로 1998년과 1999년의 유출을 계산하였다. 모의발생된 황산천의 유출을 전제 유역에 적용하여 저수지 유입량을 계산하였다.

저수량의 계산은 수위자료와 수위-저수지 용량 관계식으로부터 계산하였다. 저수지의 수위는 1998년은 온양농조의 수위기록자료를 이용하였으며, 1999년은 온양농조의 수위기록자료와 자동수위계 자료를 이용하였다.

저수지의 방류량은 식(1)의 물수지식으로 계산하였다. 유입량과 저수량은 위와 같이 구한 자료를 이용하였다. 수면강수량과 수면증발량은 기상자료를 이용하고, 손실량은 2.5 mm/d를 적용하였다.

저수지의 오염물질 유입부하량은 조사천과 황산

천의 수질과 유량자료로부터 오염물질부하량-유량 관계식(L-Q식)을 유도하여 이용하였다.

마산저수지에서 적용된 3개 box간에는 수질농도 차이에 의한 확산이 일어난다. 이를 고려하기 위해 본 연구에서는 임(1989)과 방(1990)이 multiple box 모형에서 적용한 교환유량으로 box간 확산을 고려하였다. box간 교환유량은 수온을 추적자로서 하여 box간 실측치와 계산치의 상대오차가 최소가 되는 유량으로 계산한 결과, box 1과 box 2의 상하 교환유량은 30,000 m³/d, box 1과 box 3의 수평 교환유량은 40,000 m³/d로 결정되었다.

다. 모형의 보정결과

본 연구에서 모형의 보정(calibration)은 그래프에 의한 시각적인 비교에 의해 연중 수질변화의 경향을 잘 재현하도록 하고, 상대오차를 이용하여 계산치와 실측치의 차이가 최소화되도록 매개변수를 보정하였다. 상대오차(RE)는 식 (3)으로 표현된다.

$$RE = \frac{|X_{obs} - X_{cal}|}{X_{obs}} \dots\dots\dots(3)$$

여기서, X_{obs} = 실측치, X_{cal} = 모형에 의한 계산치, N = 자료수이다.

모형의 보정에 이용된 마산저수지의 수질측정자료는 농업용수 수질개선 시험사업 보고서에 수록되어 있다.^{6,8)}

보정된 매개변수 값에 의한 모의치와 측정치의 상대오차는 Table 3과 같다. 수질항목별 평균 상대오차는 수대오차는 수온 13.8%, DO 21.6%, COD 14.7%, T-N 26.3%, T-P 24.3%이며, Chl-a

Table 3 Comparison of average and relative error between observed and calibrated values

Item	Unit	Average		Relative Error (%)
		Cal.	Obs.	
W. temp.	°C	16.3	18.5	13.8
DO	mg/L	9.3	8.5	21.6
COD	mg/L	11.3	11.3	14.7
T-N	mg/L	2.327	2.484	26.3
T-P	mg/L	0.134	0.154	24.3
Chl-a	mg/m ³	30.9	40.9	37.7

는 37.7%로 가장 높게 나타났다. Chl-a는 본 연구에서는 식물성 플랑크톤 이상의 상위생물에 대한 작용은 생략하였고, 수온이 낮은 시기에 저수지에 조류가 이상적으로 많이 발생하여 나타난 현상으로 생각된다. 보정된 매개변수의 값은 Table 4에 나타내었다.

측정치와 보정치를 그림으로 나타내면 Fig. 5와 같다. 보정치의 수질변화경향은 수온, DO, T-P는 실측치와 유사하게 모의하는 것으로 나타났으나, COD는 1999년의 경우 9월~10월 사이의 모의치가 실측치에 비해 높게 나타났다. 1999. 8월초에는 집중 강우가 있었으며, '99. 9월 중순에는 6.5~50.5 mm의 일강우량이 7일간 지속되는 특이한 강우형

Table 4 Calibration parameters for water quality model

Symbol	Unit	Range	Calibrated value
DR ₁	1/d	0.05-0.15	0.08
DR ₂	1/d	0.01-0.17	0.02
GR _{max}	1/d	1.0-2.5	2.5
I _K	MJ/m ² /d	10.4-14.6	11.2
K _{mN}	mg/L	0.0015-0.20	0.015
K _{mP}	mg/L	0.0005-0.03	0.0015
A _{OP}	mg DO/μg Chl-a	0.137	0.137
Sc	m/d	0.01-0.6	0.01
S _{N1}	m/d	0.01-0.6	0.04
S _{P1}	m/d	0.01-0.6	0.12
S _{P2}	m/d	0.01-0.6	0.02
SV	m/d	0.01-0.50	0.01
C _{af}	-	0-1.0	0.1
f _M	-	0-1.0	0.9
f _{β1}	-	0-1.0	0.9
R _{WN}	mg/m ³ /d	1.0-31.0	10.3
R _{WP}	mg/m ³ /d	0.2-50.0	2.4
R _{WC}	mg/m ³ /d	0.4-0.8	0.41
R _{VD}	mg/m ³ /d	0.2-0.4	0.3
K ₁ (20°C)	1/d	0.01-0.21	0.02
K _{N1} (20°C)	1/d	0.005-0.015	0.005
K _{N2} (20°C)	1/d	0.003-1.0	0.045
K _{N3} (20°C)	1/d	0.009-2.0	0.012
K _{P1} (20°C)	1/d	0.001-0.14	0.001
α _C	C mg/Chl-a mg	10-112	0.05
α _N	N mg/Chl-a mg	7-15	0.011
α _P	P mg/Chl-a mg	0.5-1.0	0.0005

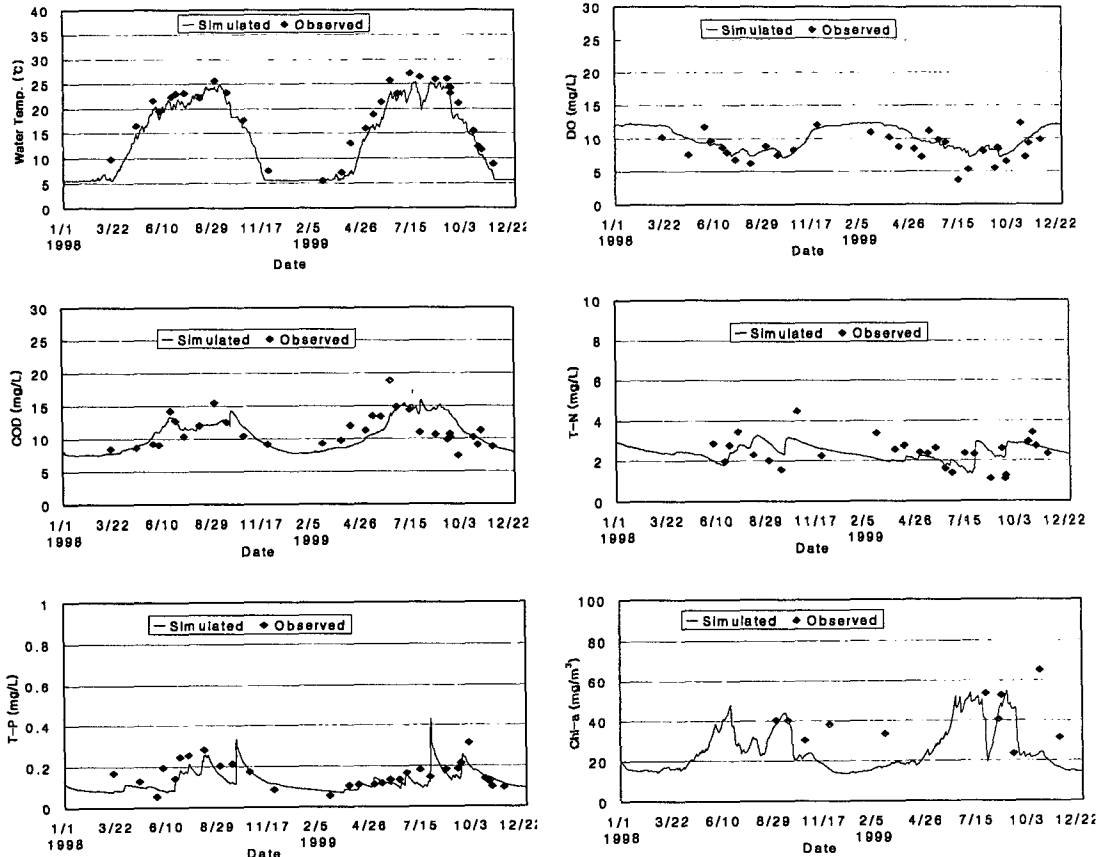


Fig. 5 Comparison between observed data and simulated values of water quality model

태를 보였다. COD는 다른 수질 항목에 비해 홍수기 전후의 농도 차이가 커 L-Q식은 이러한 계절적 변화요인을 잘 반영하지 못해 홍수기 후의 수질예측이 실측치보다 높은 경향을 보인 것으로 생각된다. T-N은 유사한 경향을 나타내고 있으나, 실측치가 높은 경우와 낮은 경우를 잘 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서, T-N은 Chl-a와 함께 호소에서 변화기작이 좀 더 연구되어야 할 것으로 생각된다.

라. 모형의 검증결과

1) 적용대상 저수지

모형의 검증에 이용된 저수지는 전북 익산시에

위치한 왕궁저수지이다. 왕궁저수지는 유역면적이 866 ha, 관개면적 540 ha, 만수면적 44.2 ha, 저수량은 2,061천 m^3 로 마산저수지 보다는 규모가 적다. 모형의 검정을 위한 수질측정자료는 왕궁저수지 기본조사보고서와 농업용수 수질조사보고서에 수록된 자료를 이용한다.^{5,7)}

2) 입력자료

모형의 검정에 이용된 입력자료는 1998~1999년의 2개 년 자료이다. 기상자료는 기온, 강수량, 운량, 풍속, 상대습도, 일사량에 대한 자료는 전주 기상관측소 자료를 이용하였으며, 일조시간은 월평균에 대한 월별 비율로 입력하였다. 유입량과 유입오염부하량은 보정의 경우와 같은 방법으로 계산하였다.

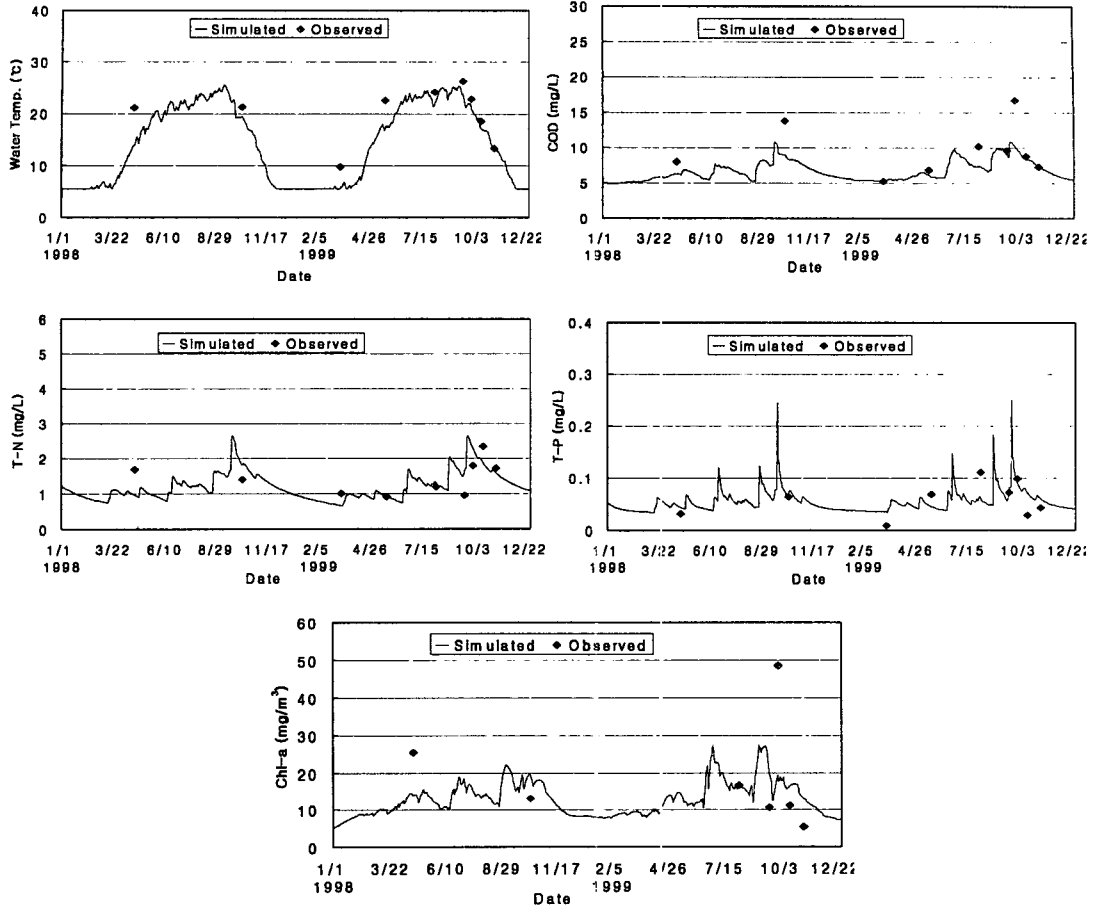


Fig. 6 Simulated and observed values of water quality in Wanggung reservoir

3) 검정결과

모형을 검정한 결과 실측치와 모의치의 평균값과 상대오차는 Table 5와 같으며, 실측치와 모의치의 수질변화경향은 Fig. 6과 같다.

수질항목별 평균 상대오차는 수온 16.3%, DO 20.0%, COD 16.7%, T-N 27.4%, T-P 38.7%, Chl-a 62.9%로 나타났다. 수온, DO, COD, T-N은 보정시 상대오차와 비슷한 경향을 보였다. T-P는 상대오차가 높게 나타났지만 Fig. 6과 같이 수질 변화경향은 실측치와 유사하게 모의되었다. Chl-a는 보정의 경우와 같이 수온이 낮은 시기에 극단적으로 실측치가 높은 경우를 모형이 반영하지 못해 상대오차가 62.9%로 높게 나타났으며, Chl-a에

대한 연구는 추가적으로 이루어져야 할 것으로 생각된다.

Table 5 Comparison of average and relative error between observed and calibrated values of water quality

Item	Unit	Average		R. E. (%)
		Cal.	Obs.	
W. temp.	°C	17.5	20.0	16.3
DO	mg/L	8.2	9.5	20.0
COD	mg/L	7.7	9.6	16.7
T-N	mg/L	1.450	1.440	27.4
T-P	mg/L	0.062	0.062	38.7
Chl-a	µg/L	16.8	18.7	62.9

2. 수질정화공법 계획에 모형의 적용

본 연구에서는 저수지 유입부에 저류지 설치, 저수지 수면에 인공식물섬의 설치, 호소수의 직접 처리를 위한 식물정화시스템이 설치된 경우에 수질 모형을 적용하고 그 결과를 분석하였다. 모형에 활용된 자료는 1998~1999년의 마산저수지 자료이다.

가. 준설지

마산저수지는 Fig. 3과 같이 유입부 부분을 깊게 준설하여 저수지 유입부에 저류지가 설치된 구조(준설지)로 되어 있다.^{6,10)} 수질측정자료와 수질 모형을 이용하여 준설지의 설치로 인한 저수지 수질개선효과를 분석하였다. 모형의 적용방법은 현재의 준설지 부분이 없다고 가정하여 저수지 부분만 있는 경우(Fig. 4의 box3만 있는 경우)에 수질을 예측하고 준설지가 형성된 현재 상태(box1, box2, box3가 있는 경우)에 대한 수질예측을 한 후 양자를 비교·분석하였다. 이 경우는 box3 규모의 저수지 유입부에 box1, 2 규모의 준설지가 조성된 경우의 수질개선효과를 분석한 경우에 해당될 수 있다. 이와 같은 방법으로 분석한 준설지의 수질개선효과는 Table 6과 같다.

저수지 내에서 T-N과 T-P의 수질개선효과는 18.6%와 22.3%로 나타난 반면 Chl-a는 오히려 16.1%가 증가되는 것으로 예측되었다. COD는 준설지가 설치된 후에도 개선효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 이것은 준설지에서 N, P가 일부 제거되어 저수지의 내부 생산 COD를 감소시키지만 준설지에서 조류의 대량 발생으로 유기물이 증가되어 저수지로 유입되므로 COD는 개선되지 않는

Table 6 Effect of dredged pool on reservoir water quality improvement

Cases	COD mg/L	T-N mg/L	T-P mg/L	Chl-a mg/L
Before dredged	10.0	2.948	0.157	0.0216
After dredged	10.3	2.400	0.122	0.0250
Improvement (%)	-2.2	18.6	22.3	-16.1

것으로 분석된다.

나. 인공식물섬

인공식물섬 설치에 따른 수질개선효과를 수질모형을 통해 평가하기 위해 수질변화 방정식을 수정하여 적용하였다. 물질수지식인 식 (2)의 오른쪽에서 수생식물의 흡수에 의해 제거되는 물질의 양(TR_j)을 감하였다. 식물에 의한 영양염류 흡수량 계산은 마산저수지 수표면에 설치된 인공식물섬의 자료를 활용하였다.^{6,15)} 월별 줄기부의 순성장량 자료에 줄기부에 대한 뿌리부의 비율을 고려하여 전체 식물순생산량을 계산한 후 식물체에 속해 포함된 N과 P의 비율을 곱하고 이를 일별로 환산하였다. 식물에 의해 제거되는 수질성분은 $PO_4\text{-P}$ 와 $NO_3\text{-N}$ 로 하였다. 그 외 인공식물섬의 영향을 받는 태양복사열, 재폭기 항에 저수지의 수표면에서 인공식물섬이 차지하는 면적의 비율을 고려하도록 모형의 방정식을 수정하였다.

수질모형으로 인공식물섬의 면적이 증가에 따른 저수지 수질 개선효과를 분석한 결과, Table 7과 같이 연구 대상 저수지 만수면적(92 ha)의 10%인 9.2 ha 크기의 인공식물섬을 조성할 경우 COD는 설치전의 10.4 mg/L에서 설치 후에는 9.8 mg/L로 예측되어 COD 개선효과는 5.1%로 나타났다. T-N은 14.1%, T-P 13.1%, Chl-a 16.3%가 개선되는 것으로 분석되었다. COD의 개선효과는 인공식물섬의 식물에 의해 영양염류가 흡수되고, 인공식물섬에 의해 햇빛이 차단되어 조류의 성장이 억제되어 나타난 현상이다. 농업용 저수지의 목표수질인 COD 8 mg/L을 유지하기 위해서는 더 이상의 규모가 필요하지만 저수지의 수위변화에 따라 인

Table 7 Effect of the floating island on reservoir water quality improvement

Area (ha)	COD		T-N		T-P		Chl-a	
	WQ	Impr	WQ	Impr	WQ	Impr	WQ	Impr
	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%	mg/m ³	%
0.0	10.4	0.0	2.420	0.0	0.125	0.0	0.025	0.0
4.6	10.1	2.0	2.230	7.8	0.116	7.0	0.024	9.7
9.2	9.8	5.1	2.078	14.1	0.108	13.1	0.022	16.3

공식물섬의 설치위치가 줄어들고, 보트놀이, 수상 스키 등 저수지 수면 이용 등을 고려할 때 많은 면적의 인공식물섬 조성은 어려울 것으로 판단된다.

다. 식생정화시스템

식생정화시스템의 설치에 따른 저수지 수질개선 효과를 분석하기 위하여 물질수지식인 식 (2)의 오른 쪽 항에 식생정화시스템에 의해 제거되는 물질의 양(TR_p)을 감하도록 하였다. 추가적으로 필요한 입력자료는 식생정화시스템의 면적, 공급유량, 처리효율 자료이다. 마산저수지의 식생정화시스템의 수질처리효율을 분석한 결과^{6,9)} 단위면적당 공급유량 2.1 $m^3/m^2/d$ 의 조건에서 COD 15.2%, T-N 14.1%, T-P 20.1%로 나타났다. 식생정화공법의 도입으로 인한 유기물과 영양염류의 제거량 계산을 위한 모형의 구성은 설치하고자 하는 식생정화시스템의 면적에 단위면적 당 공급유량 2.1 $m^3/m^2/d$ 을 곱하여 공급유량을 결정하고 여기에 저수지의 수질농도를 곱하여 부하량을 계산하였다. 계산된 부하량에 처리효율을 곱하여 제거량이 결정되도록 하였다. 식생정화시스템의 운영기간은 수생식물이 미생물의 접촉면을 제공할 수 있는 기간인 5~11월로 하였다.

식생정화시스템의 면적을 증가시키면서 수질모형을 적용한 결과를 Table 8에 정리하였으며, 식생정화시스템 적용 전후의 수질변화를 Fig. 7에 나타내었다.

Table 8 Effect of vegetation purification system on reservoir water quality improvement

Area (ha)	COD		T-N		T-P	
	WQ mg/L	Impr %	WQ mg/L	Impr %	WQ mg/L	Impr %
0.0	10.4	0.0	2.420	0.0	0.125	0.0
0.3	10.3	0.6	2.382	1.5	0.124	0.6
1.0	10.2	1.9	2.316	4.2	0.122	1.9
5.0	9.5	8.6	2.050	15.3	0.113	9.0
10.0	8.1	21.5	1.727	28.6	0.095	23.5
17.0	7.9	23.6	1.685	30.3	0.092	25.9

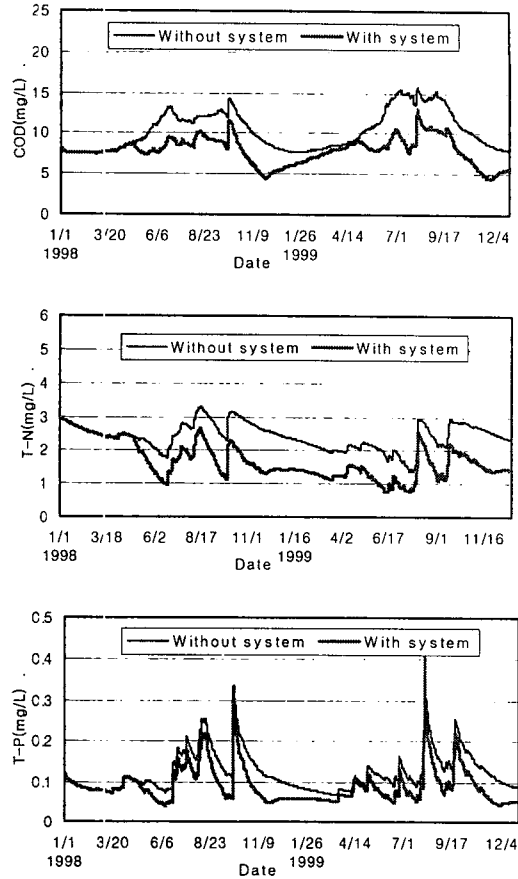


Fig. 7 Effect of the vegetation purification system having an area of 17 ha on reservoir water quality

식생정화시스템의 면적을 17 ha로 증가할 경우 COD는 7.9 mg/L으로 개선되어 농업용 저수지의 목표수질인 COD 8 mg/L을 유지할 수 있는 것으로 분석되었다. 그러나, 대규모의 식생정화시스템의 설치를 하려면 부지사용의 제한을 받게 되고, 유지관리도 크게 소요될 것으로 예상된다. 따라서 식생정화시스템 하나의 공종으로 저수지의 목표수질을 달성하기는 쉽지 않을 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

우리 나라 관개용 저수지의 수질예측과 수질개선대책의 수립에 활용하기 위하여 수질모형을 개

발하고 수질개선공법을 적용한 바 그 결과를 요약 하면 다음과 같다.

1. 저수지의 특성에 따라 여러 개의 box로 분할 하여 각 box에서의 일별 평균수질을 계산할 수 있도록 모형을 구성하고 관개용 저수지에 적용한 결과 전반적으로 실측치와 모의치의 상대오차가 크 지 않고, 일별 수질변화경향도 유사하게 모의할 수 있어 관개용 저수지의 수질예측에 유용하게 활 용될 수 있을 것으로 판단되었다.

2. 그러나, 저수지 유입부하량의 계산을 위해 도 입된 L-Q식은 계절별, 강우특성별 수질변화특성 을 잘 반영할 수 없어 장마기 직후에 호소의 COD 가 잘 예측되지 않는 경향이 있으므로 강우 특성 을 감안한 유입부하량 산정기법의 개발이 필요하 며, 또한 수온이 낮은 시기에 조류가 높게 나타나는 현상은 현재의 수질 방정식으로 잘 예측하기 어려우므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것 으로 나타났다.

3. 수질모형으로 호소수질정화공법의 효과를 분 석해 본 결과 수질정화공법의 규모에 따라 COD, T-N, T-P의 변화경향을 추정할 수 있어서 수질 정화공법의 효과를 정량적으로 평가하는데 활용될 수 있을 것으로 판단되었다.

4. 여러 가지 수질정화공법에 대해 호소의 목표 달성을 위한 적절한 규모를 모의해 본 결과, 단일 공법으로는 저수지 주변 여건을 고려할 때 적용되 기 어려운 규모로 예측되므로 수질정화공법의 도 입은 각 공법의 특성, 부가적인 기능, 부지의 확보 가능성, 호소의 관리 측면 등을 충분히 고려하여 각 공법을 적절하게 조합하고, 수질모형으로 각 공법의 최적규모를 결정하여 호소 수질개선계획을 수립해야 할 것으로 생각된다.

이 논문은 농림부·농업기반공사의 농업용수 수질개선 시험사업으로 수행한 결과를 이용하 였음.

▶ 기 호

C_{af}	: ammonia preference factor
A_b	: Area of bottom sediment, m^2
A_{ij}	: Interfacial area between box i and j, m
A_{OP}	: Ratio of mg DO to μg chlorophyll-a
C_{af}	: Coefficient in ammonia preference factor
DIN	: Concentration of dissolved inorganic nitrogen, mg/L
DO_S	: Saturated dissolved oxygen, mg/L
DIP	: Concentration of dissolved inorganic phosphorus, mg/L
DR_1	: Respiration rate of phytoplankton, 1/d
DR_2	: Rate of nonpredatory mortality, 1/d
GR	: Growth rate of phytoplankton, 1/d
f_d	: Fraction of daylight
f_M	: Fraction of Organic-N to T-N produced by depth of phytoplankton,
f_{p1}	: Fraction of Organic-P to T-P produced by depth of phytoplankton,
GR_{max}	: Maximum growth rate of phytoplankton, 1/d
I_K	: Optimum light intensity, $MJ/m^2/d$
I_0	: Light intensity at water surface, $MJ/m^2/d$
I_z	: Light intensity at water depth Z m, $MJ/m^2/d$
K_a	: Reaeration coefficient
K_e	: Extinction coefficient, 1/m
$K_1(T)$: COD decay rate at $T^\circ C$, 1/d
K_{mN}	: Half-saturation concentration of DIN, mg/L
K_{mP}	: Half-saturation concentration of DIP, mg/L
K_{N1}	: Ammonification rate of Organic-N at $T^\circ C$, 1/d
K_{N2}	: Nitrification rate of NH_3-N at $T^\circ C$, 1/d
K_{N3}	: Nitrification rate of NO_2-N at $T^\circ C$, 1/d
K_{P1}	: Mineralization of Organic-P at $T^\circ C$, 1/d
K_R	: Respiration coefficient of phytoplankton, 1/d
$PHYT$: Concentration of phytoplankton as chlorophyll-a, mg/m^3
R_{WC}	: Release rate of COD from sediment, COD $mg/m^2/d$
R_{WD}	: Sediment oxygen demand, DO $mg/m^2/d$
R_{WN}	: Release rate of ammonia from sediment, N $mg/m^2/d$
R_{WP}	: Release rate of phosphate from

sediment, P mg/m²/d
 S_c : Settling Velocity of COD, m/d
 S_{V1} : Settling velocity of Organic-N, m/d
 S_{P1} : Settling velocity of Organic-P, m/d
 S_{P2} : Settling velocity of PO₄-P, m/d
 ST : Settling rate of phytoplankton, /d
 SV : Settling velocity of phytoplankton, m/d
 T : Water temperature, °C
 V_i : Volume of box i, m³
 Z : Water depth, m
 a_C : Carbon composition to phytoplankton biomass, C mg/ch-a mg
 a_N : Nitrogen composition to phytoplankton biomass, N mg/ch-a mg
 a_P : Phosphorus composition to phytoplankton biomass, P mg/ch-a mg
 θ_i : Temperature adjustment coefficient of component i

참 고 문 헌

1. 권순국, 방기웅, 유명진, 1990, 담수호의 수지 예측 및 부영양화 방비에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 10(4), pp.159-171
2. 김좌관, 1994, 중소 인공호의 수질예측을 위한 변형 2상자 동적모형의 개발, 서울대학교 박사학위 논문
3. 김현영, 박승우, 1988, 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의발생(I), 한국농공학회지, 30(1), pp.50-62
4. 김현영, 박승우, 1988, 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의발생(III), 한국농공학회지, 30(3), pp.95-105
5. 농림부·농업기반공사, 1999a, 농업용수 수질조사 보고서
6. 농림부·농업기반공사, 1999b, 농업용수 수질개선 시험사업 보고서(III)
7. 농림부·농업기반공사, 1999c, 왕궁저수지 농업용수 수질개선사업 기본계획(안)
8. 농림부·농업기반공사, 1998, 농업용수 수질개선 시험사업 보고서(II)
9. 박병훈, 장정렬, 이광식, 윤경섭, 권순국, 2000, 저수지 수질개선을 위한 식생정화시스템, 한국농공학회지 42(4), pp.87-95
10. 박병훈, 장정렬, 권순국, 1999, 저수지 수질개선을 위한 저수지 내 침전지 조성, 한국농공학회지, 42(1), pp.73-82
11. 박병훈, 장정렬, 권순국, 1998, 농업용 저수지의 수질개선방안에 관한 연구, 한국농공학회 학술발표회 발표논문집, pp.500~507
12. 방기웅, 1990, 하구 담수호 수질예측모형의 개발, 서울시립대학교 박사학위논문
13. 백영철, 1991, 우리 나라 인공호수의 물리적 환경도인이 부영양화에 미치는 영향에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문
14. 서영지, 1997, 탱크모형의 매개변수 결정에 관한 연구, 한국수자원학회논문집, 30(4), pp.327-334
15. 이광식, 장정렬, 김영경, 박병훈, 저수지 수질개선을 위한 인공식물섬 조성에 관한 연구, 한국환경농학회지 18(1), pp.77-82
16. 임종완, 1989, 담수호 Multiple box 수질모형의 개발과 적용, 서울대학교 박사학위 논문
17. 平塚茂雄, 冲野外輝夫, 西田直短, 田中哲治郎, 1981, 湖の物質循環モデルと水質の豫測, 国立公害研究所 研究報告, 18, pp.92-113
18. 宮崎忠國, 中彬修身, 1981, 湖沼の物質循環モデル, 国立公害研究所 研究報告, 18, pp.83-91
19. 森北佳昭, 1987, 貯水池の冷濁水ならびに富栄養化現象の数値解析モデル, 土木研究所資料 第2443號, 建設省 土木研究所, pp.141-159
20. Ambrose, R. B., J. M. Wool, and J. P. Connolly, 1991, WASP5, US. EPA
21. Hydrcllogic Engineering Center, 1978, Water quality for river-reservoir systems, US. Army Corps of Engineers, Water Resources Support Center.
22. Raghunath, H.M., 1985, Hydrology principles, analysis and design, John Wiley & Sons