

## WASP5 & WASP Builder을 이용한 농업용저수지 유역의 수질관리

정팔진 · 고흥석\* · 현미희† · 이은주

전북대학교 공과대학 환경화학공학부  
\*전북대학교 농과대학 생물자원시스템공학부

## Water Quality Management using WASP5 & WASP Builder for a Basin of an Agricultural Reservoir

Paul-Gene Chung · Hong-Seok Goh\* · Mi-Hee Hyun† · Eun-Ju Lee

Division of Environmental & Engineering Chonbuk National University, Chonbuk 561-756, Korea  
\*Division of Bioresource Systems Engineering Chonbuk National University, Chonbuk 561-756, Korea  
(Received 27 April 2004, Accepted 25 August 2004)

**Abstract** : Water quality modeling was performed for the purpose of diagnosis and prediction of water quality in Gyoung Choen reservoir, using EUTRO5/WASP Build model. WASP Builder is capable of visual display in window and it has an advantage of updating and modification for data. Field data of 1992, Spring, Summer, and Fall, were used to calibrate model and these results were validated using data of 2000, Spring, Summer, and Fall. The reservoir was divided into 4 epilimnion segments. Water quality system for modeling were consist of BOD, Chlorophyll-a, DO, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, T-N, PO<sub>4</sub>-P, T-P. The results of water quality modelling using EUTRO5/WASP Builder, a range of the Correlation for calibration of BOD, T-N, T-P, and Chlorophyll-a according to three seasons are 0.63~0.90, 0.81~0.97, 0.75~0.98, and 0.77~0.98 respectively. And the correlation between simulated and observed values for verification of BOD, T-N, T-P, and Chlorophyll-a according to three seasons are 0.93, 0.94, 0.81, and 0.80 respectively. Among the pollutant sources for a basin of the Gyoung Choen reservoir, generated amount of livestock is the highest and BOD, T-N, T-P of generated loading percentage are 94%, 81%, and 95%. So, we suppose that inflow load amount will decrease 50% and increase 50% only livestock about current load amount. If increasing load amount of livestock 50% in segment 2 and 3, BOD, T-N, and T-P simulated increasing to range of 0.02~0.15 mg/ℓ, 0.029~0.08mg/ℓ, 0.011~0.029mg/ℓ in comparison with current water quality

**keywords** : Gyoung Choen reservoir, WASP5, WASP Builder, Calibration, Verification

### 1. 서론

농촌의 수질환경은 하수처리등, 환경기초시설의 투자가 도시지역에 비하여 너무 미흡하다. 농촌지역은 축산폐수, 산업폐수, 생활오수, 농경지로부터의 농약 및 비료등 각종 오염원이 적절한 처리없이 소하천의 유입으로 하천수질이 악화되고 있으며, 호소와 저수지는 각종 영양물질의 유입으로 부영양화가 진행되고 있으므로 농촌의 농업용저수지유역의 적절한 수질관리가 요구되어진다.

현재 국내에서는 저수지 및 호소의 수질예측에 이용되는 모형중 WASP5 모형은 개발된 모형 중에서 비교적 신뢰성이 인정되고 널리 사용되고 있는 모델로서, 초기모형 WASP(Di. Toro et al., 1983 ; Connolly and Winfield, 1984 ; Ambrose, R. B. et al., 1988)에서 여러 차례 개정 및 보완을 통해 보강된 프로그램으로 자연현상과 인간활동에 의해 발생하는 다양한 오염물질에 대한 수질의 예측 및

해석을 할 수 있을 뿐만 아니라 수체와 바닥층의 저서생물군 활동에 대한 영향을 고려할 수 있는 유동구획 모형이다.

본 연구에서는 미국 환경부에서 개발하여 관리해오고 있는 WASP5의 부프로그램 중 일반 수질항목에 대한 모델인 EUTRO5와 WASP5 수질모델링 프로그램에서 input 파일 설계를 위한 윈도우 95/96/NT tool인 WASP Builder을 이용하였다.

EUTRO5는 도스형 프로그램이므로 실행시킨 out put의 \*.edf 파일을 윈도우상에서 볼 수 없어서 불편하다. 그러나 입력파일을 WASP Builder로 연계하여 실행시키면 사용자가 선택하는 항목에 대해서만 시뮬레이션된 값들을 화면에 보여주므로 시각적으로 편리함을 주며, 입력 화면에서 자료의 수정과 업데이트도 가능하다. 이에 본 연구에서는 2002년도 청천저수지 유역의 오염원자료를 이용하여, 오염원 중 오염부하 기여율이 가장 높은 가축에 의한 오염원이 50% 증가 할 경우 및 50% 감소할 경우와 2010년의 수질예측에 윈도우 tool인 WASP Builder를 이용하여 농업용저수지유역의 수질관리 방안을 모색하는데 도움이 되고자 한다.

\* To whom correspondence should be addressed.  
hyun0821@hanmail.net

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 대상저수지 유역

대상저수지 유역은 전북 완주군 화산면 일대를 집수구역으로 하고, 운주면 구제리와 경천면 일대를 간접유역으로 하고 있는 경천저수지이다. 경천저수지 유역면적은 직접유역이 6,400ha와 간접유역이 3,365h이며, 관개면적은 7,738ha, 만수면적은 319ha, 저수량은 25,346천m<sup>3</sup>이다. 유역의 표고는 최고 456m에서 최저 100m로, 비교적 경사가 급한 지역으로써 강우시 유출율은 평균 70% 정도이다.

저수지 유입하천은 직접유역의 수계는 크게 운산리에서 유입되는 유로연장 11km의 화평천을 주유입하천으로 하고 있으며, 저수지의 우측 상류의 유로연장 7.8km의 승치곡천이 유입된다. 화평천은 대치천·석학천·수락천 등 3개의 지천을 가지며, 또한 간접유역의 수계는 운주면 구제리를 거쳐 경천저수지 제방 하류의 고산천으로 합류되는 구룡천의 상류로써 18km 지점에 위치한 용복보에서 취수되어 용복취입수로를 통해 경천저수지로 도수된다.

경천저수지의 유출수는 고산천으로 유하하여 어우보에서 도수되어 제1도수로를 이용하여 취입된다. 경천저수지와 대아·동상저수지의 물은 어우보에서 취수되어 제1도수로를 통해 전주, 완주, 익산, 군산지역의 농업용수 및 상수원수, 전주공단의 공업용수 등으로 공급되고 있다. 경천저수지의 유역도는 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2. EUTRO5 수질모형(Eutrophication Model)

#### 2.2.1. 모형의 개요

WASP5의 부모모델인 EUTRO5 모델에 의하여 모의 가능한 수질항목으로는 NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, Chlorophyll-a, CBOD, DO, organic-N, organic-P 등이 있다. 이 부모모델에서 모의하는 수질항목간의 반응 모식도는 Fig. 2에 나타내었다. 모델의 중심은 식물성 플랑크톤이 되며, 식물성 플랑크톤의 성장률에 빛과 무기영양염류가 직접적으로 관련되

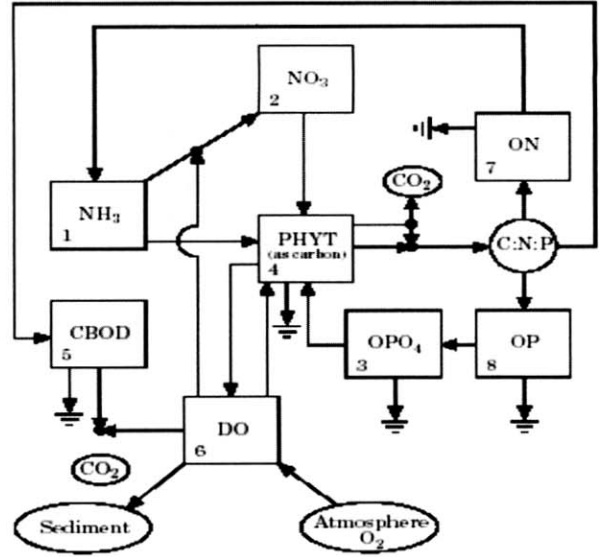


Fig. 2. State variables simulated in the model, WASP5.

어 있음을 알 수 있다. 또한, 주요 수질항목인 BOD, DO도 식물성 플랑크톤 및 영양염류와 연결되어 계산된다.

#### 2.2.2. 기본방정식

EUTRO5 부모모델의 계산격자망은 여러개의 Segment로 구성되며, 수평방향과 수직방향의 배열을 통해서 2차원, 3차원 모델로 확장할 수 있다. 이 모델의 지배방정식은 연속성과 물질수지 법칙이 이용되는 질량 보존 방정식으로 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x}(U_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(U_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(U_z C) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x}(E_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x}(E_y \frac{\partial C}{\partial y}) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x}(E_z \frac{\partial C}{\partial z}) + S_L + S_B + S_K \end{aligned} \quad (1)$$



Fig. 1. Basin map of Gyoung Choen reservoir.

여기에서, C: 분할된 구획의 수질성분 농도(mg/l); t: 시간(day);  $S_L$ : 외부로부터의 오염부하량( $g/m^2/day$ );  $S_B$ : 경계면으로부터의 오염부하량( $g/m^2/day$ );  $S_k$ : 동력학적 반응에 의한 내부 변화량( $g/m^2/day$ );  $U_x, U_y, U_z$ : 길이방향, 횡방향, 깊이방향에 대한 각각의 유속(m/day);  $E_x, E_y, E_z$ : 길이방향, 횡방향, 깊이방향의 확산속도( $m^2/day$ ).

2.2.3. WASP Builder의 사용 및 장점

본 연구에서는 경천저수지의 수질 예측을 위하여 EUTRO5 수질모델을 사용하였으며, EUTRO5는 DOS 운영체제에서 수행되는 모델로서 윈도우 화면에 나타낼 수 없으므로 EUTRO5 입력파일을 윈도우 tool인 WASP Builder로 실행하여 수질 모의를 실시하였다.

본 연구에 사용된 윈도우 tool인 WASP Builder는 다음과 같은 장점이 있다.

- ① 층들사이의 매개변수 그룹과 연결되어져 있으며 세그먼트구간과 확산을 도식화 할 수 있다.
- ② 매개변수 그룹들을 연결해서 시각적으로 표현할 수 있다.
- ③ WASP의 매개변수 그룹들의 새작업과 수정이 가능하다.
- ④ 사용자가 WASP input data sets을 나타낼 수 있다.

2.3. 모델의 적용

2.3.1. 대상저수지 구획분할

본 모의에서의 Segment 수는 수질측정지점의 위치, 수체의 특성, 각 Segment에서의 체류시간, 각 Segment의 체적등을 고려하여 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 segment 1, 2, 3, 4, 5로 구분하였으나, segment 5의 경우는 segment 5의 경계가 유출이면서 한쪽으로는 유입도 되므로 segment 5의 경계면의 유입자료를 입력하기 위하여 더미(가짜) segment를 두어 segment 4로 하였다. 경천저수지에 대해서는 수심이 낮기 때문에 수직적인 성층현상은 발생하지 않는 것으로 나타나 수직적인 구획분할은 큰 의미가 없는 것으로 사려되어 유속방향으로만 구획분할을 하여 2차원 모형을 구축하였다. 이때 유입유량은 실측한 유량을 사용하였다.

W-1구역에서 segment 1로 유입되는 유입하천은 저수지 우측 상류의 승치곡천이며, W-2구역에서 segment 2로 유입되는 화평천은 대치천·석학천·수락천 등 3개의 지천을 가지며, W-3구역에서 segment 4로의 유입은 황골계곡이다. 그리고 W-4(간접유역)에서도 segment 4로 유입되는 구룡천의 경우는 용복보에서 취수되어 용복취입수로를 통해 경천저수지로 도수되는데 이는 강우발생시와 저수량 부족시(저수율 50% 미만)만 유입된다. 수질모의시 W-4(간접유역)는 자료부족으로 제외하였다.

2.4. 입력자료의 구성

WASP5 모형의 적용을 위한 입력자료는 10개의 Group으로 분류되어 있으며, 세부사항은 다음과 같다.

2.4.1. 수체의 체적 및 유량

모델 구성의 기초입력자료인 각 구간별 체적과 표면적 등은 2001년도 농업기반공사에서 측량한 자료를 이용하였으며, Table 1에 나타난 바와 같다.

본 모의에서는 EUTRO5 부모모델에서 요구하는 호소의 유입유량, 유속, 수심 등의 흐름 입력자료는 기존의 실측치를 참고하여 활용할 수 있기 때문에 이러한 흐름 입력자료를 얻기 위해서 사용하는 DYNHYD5 부모모델은 필요하지 않았다. 따라서 경천저수지의 수질변화 모의에서는 EUTRO5 부모모델만이 필요하였으며, 그 외의 수치들은 여러 가지 참고문헌을 이용하여 산정하였다.

Segment수는 수질측정지점의 위치, 수체의 특성, 각 Segment에서의 체류시간, 각 Segment의 체적등을 고려하여 5개로 나누었으나, Segment 4는 임의값을 준 더미(가짜)이므로 Table 1에 자료를 나타내지 않았다.

경천저수지의 수직적인 구획분할은 자료가 부족하고, 또한 수심이 깊지 않기 때문에 수직적인 성층현상은 크게 발생하지 않는 것으로 나타나 유속방향으로만 구획분할을 하여 2차원 모형으로 구축하였다.

2.4.2. 경계조건

모의하고자 하는 수체에 대해 유량의 유입과 유출이 일

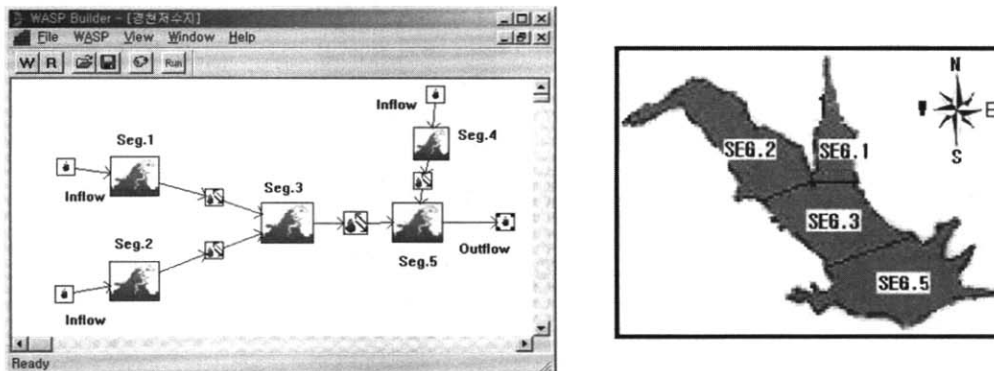


Fig. 3. Segment division of Gyoung Choen reservoir.

**Table 1.** Physical characteristics of each segments

Segment number	Surface area (m <sup>2</sup> )	Average depth (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
Segment 1	551,250	5.0	2,756,250
Segment 2	840,000	7.0	5,880,000
Segment 3	720,000	9.0	6,480,000
Segment 5	920,000	13.0	11,960,000

**Table 2.** Calibrated values of reaction coefficients using EUTRO5 model.

CONT	ISC No.	Manul	This study
K1320C	11	0.09~0.13	0.09
K1320T	12	1.08	1.08
KNIT	13	0.5	2.0
K140C	21	0.09	0.01
K140T	22	1.08	1.08
KNO3	23	0.1	0.1
K1013C	91	0.075	0.02
K1013T	92		1.08
PCRB	57	0.01~0.047	0.01
K58C	100	0.075	0.15
K58T	101		1.047
OCRB	81		2.67
KDC	71	0.16~0.21	0.05
KDT	72	1.047	1.05
KIRC	50	0.02-0.2	0.125
KID	52	0.02	0.035

어나는 구간에 대해서는 이의 영향을 고려하기 위하여 시간 변화에 따른 모의 항목의 수질 농도가 입력되어야 한다. 수질모의는 1992년 측정된 실측농도를 이용하여 수질모의를 실시하였다.

이들은 각 소유역으로 유입되는 경계농도로 하여 시간 변화에 따라 입력하였다.

#### 2.4.3. 매개변수 및 반응상수

본 연구에서는 EUTRO5에서 모의할 수 있는 14개의 매개변수 중 12개를 이용하였으며, 총 42개의 반응상수 중 25개의 상수를 고려하여 경천저수지의 수질을 모의하였다.

대상저수지에 대한 EUTRO5의 적용을 위해 반응계수값을 모형의 개발시 적용된 기본값을 초기값으로 하여, 국내외에서 조사되어진 반응계수값의 범위내에서 실측치에 근접할 때 까지 변형을 시도하였다. 경천저수지에 적합하도록 보정된 주요 반응상수들의 값은 Table 2에 나타내었다. K140C의 사용값이 0.01로 일반적인 값 0.09 보다 작은 것은 DO의 농도가 7.5~8.9mg/ℓ로 상대적으로 높아 탈질이 거의 일어나지 않음을 반영한 것으로 생각한다.

#### 2.4.4. 시간함수

소구간의 환경적 특성에 대한 시간에 따른 변화를 고려하는데 사용되는 시간함수에 대해서는 총 22개 중 10개의

시간함수를 고려하여 모의하였다. 시간에 따른 호내 수온의 변화는 실측 수온을 입력하였다. 또한 월 평균 기온, 태양 에너지의 세기, 주간 광량의 세기 및 풍속의 변화등도 참고자료 및 기상청자료를 이용하여 입력하였다. 광소멸계수는 투명도를 이용하여 모의하였다.

기온, 일조시간, 풍속, 일사량 및 일조율등은 전주기상청에서 최근 8년 동안 측정된 자료를 이용하여 월별 평균값을 입력하였다. WASP5 모델에서는 기상자료의 공간변화를 고려할 수 있으나, 저수지유역내의 관측소는 전주기상청 1개뿐이어서 공간적인 기상변화는 고려하지 않았다.

#### 2.5. 오염부하량의 산정

유역으로부터 발생부하량은 인구, 축산, 토지이용에 따른 원단위를 적용하여 계산하였다. 유역에서 오염발생부하량을 산출하기 위해서는 오염원별모의의 실측자료를 이용하는 것이 원칙이나 본 연구에서는 환경부 고시 제 1999-143호에 준하여 부하량을 산정하였다. 점오염원 및 비점오염원에서 발생된 오염물질은 각각의 오염원에서 처리된 상태 또는 미처리된 상태로 유역으로 배출되고, 유역에 배출된 오염물질 중의 일부는 자연정화되고 그 나머지가 하천이나 호소로 유입된다.

인구에 의한 발생부하량은 인구수에 발생원단위를 곱하여 산정하였으며, 축산에 의한 발생부하량은 가축사육두수

에 발생원단위를 곱하여 산정하였고, 토지에 의한 발생부하량은 토지이용 면적에 발생원단위를 곱하여 산정하였다.

인구에 의한 배출부하량계산시 대상구역은 비시가화하수미처리지역이며, 이때의 배출부하량은 '수거식 인구 × 원단위 × (1-분뇨부하비)'로 계산하였으며, 이때의 분뇨부하비는 인구 발생원단위에서 분뇨가 차지하는 비율로 BOD, TN, TP 각각 0.35, 0.82, 0.60이다.

축산에 의한 배출부하량계산시 대상구역에서의 축산폐수 처리시설이나, 개별처리시설은 없으나, 축산분뇨 자원화 시설 등을 통해 처리된 후에 배출된 부하량으로 다음의 식을 이용하였다.

$$\text{배출부하량} = \text{축종별 사육두수} \times (\text{축산분뇨 발생원단위} - \text{축산폐수 발생원단위}) \times (1 - \text{축산분뇨자원화시설 처리율}/100) \times \text{농지배출계수} \times \text{비점오염원배출계수}$$

토지이용에 의한 배출부하량은 토지용도별 발생부하량에 비점오염원 배출계수를 곱하여 산정하였다. 환경부 고시된 비점오염원 배출계수는 0.25이지만, 이는 저수기에 적용되는 수치이므로, 본 연구에서는 비점오염원 배출계수를 1로 하여 계산하였다.

2.6. 수질예측

수질오염부하량의 증감은 오염원, 유량, 강우시의 유출률, 오폐수처리장의 가동 등 때문에 일어날 수 있다. 경천저수지 유역내에서 발생하는 오염원별 기여율을 보면 가축에 의한 발생량이 BOD의 경우 94.4%로 가장 높고, 다음이 인구 3.4%, 토지 2.2% 순이었고, T-N의 경우는 가축 81.0%, 토지 14.8%, 인구 3.6% 순이며, T-P의 경우는 가축 95.3%,

토지 3.25%, 인구 1.43%로 T-N과 같은 경향을 보였다. 이에 따라 이 유역의 오염원의 기여율이 가장높은 가축에 의해 발생하는 수질 변화를 예측하고자 현재에 비해 가축에 의한 부하량이 50% 감소, 50% 증가되었을 때 예측수질항목 농도가 어느 정도 변화하는가를 모의하였으며, 또한 2010년의 수질을 모의하여 장래의 수질을 예측하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모형의 보정

모형의 보정을 위한 상류경계에서의 유입수질 자료로는 "가두리 양식장 실태 조사 보고서"의 1992년 계절별 측정 자료를 참고하였다.

모형의 보정은 모형에 의한 계산치가 실측치와 어느 정도 일치할 수 있는가와, 불확실한 변수(parameter)들을 재현 능력이 향상될 수 있도록 재조정하므로써 모형에 적합한 최적변수들을 구하는 과정으로 최적변수를 얻기 위해서는 계산치와 실측치를 비교함으로써 계산치와 실측치간의 오차를 최소화하는 것이다.

대상저수지에 대한 EUTRO5의 적용을 위해 반응계수값을 모형의 개발시 적용된 기본값을 초기값으로 하여, 국내외에서 조사되어진 반응계수값의 범위내에서 실측치에 근접할 때 까지 변형을 시도하였다.

본 모의에서는 저니층의 수질은 고려하지 않았으므로, 5개 상층 구간에 대해서만 수질을 모의하였다.

한편 모형의 보정결과에 대한 실측치와 예측치의 비교는 더미 구간인 segment 4를 제외하고 각 segment별 Fig. 4~7에 나타내었다. 예측치의 T-N값은 유기질소, 암모니아성 질소 및 질산성 질소등의 값을 합한 것이며, T-P값은 유기

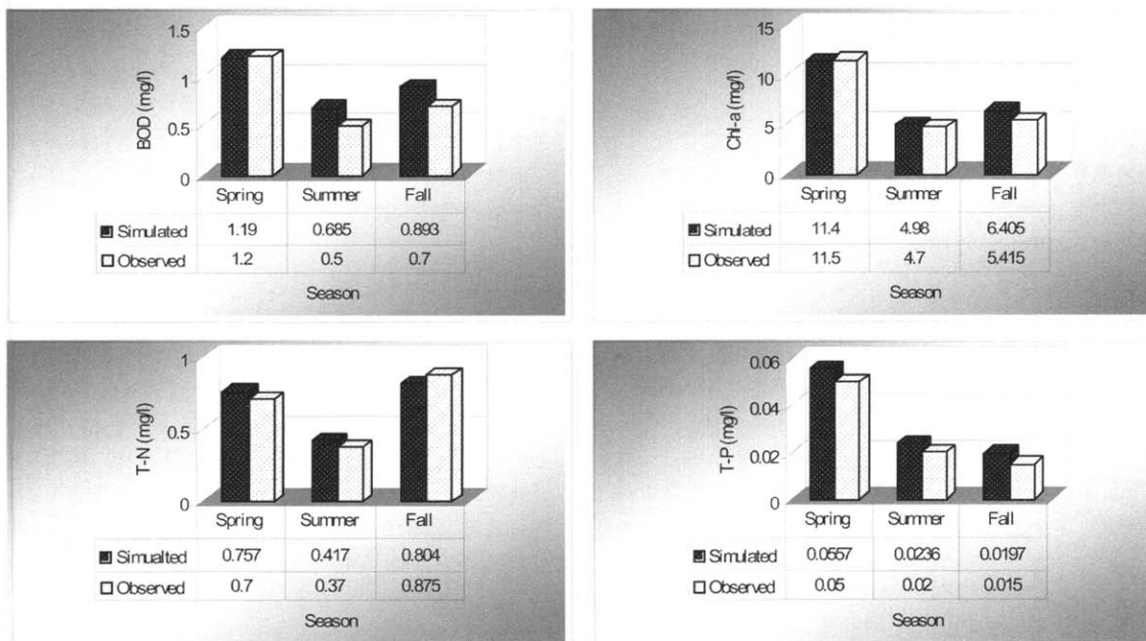


Fig. 4. Comparisons between observed and simulated values of BOD<sub>5</sub>, T-N, and T-P in segment 1.

인과 무기 인산염등의 값을 더한 값이다.

각 Segment에서의 보정 결과, segment 1의 계절별 예측치는 실측치의 경향이나 범위를 대체적으로 잘 반영하고 있다. 그러나 segment 2 및 segment 3의 경우, 봄의 예측치가 모두 낮게 추정되었으며, 반면 여름 예측치는 모든 항목이 다소 높게 추정되고 추정되었다. BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P,

Chlorophyll-a의 실측치와 계산치의 값들에 대한 상관관계의 범위를 보면 BOD<sub>5</sub>는 0.65~0.91, T-N은 0.81~0.98, T-P는 0.76~0.99, 그리고 Chlorophyll-a의 상관관계는 0.79~0.98의 범위였으며, Table 3에 나타내었다. 1992년 자료를 이용하여 보정한 경천저수지의 수질 모의 결과 실측능도를 잘 반영하는 것으로 평가되었다.

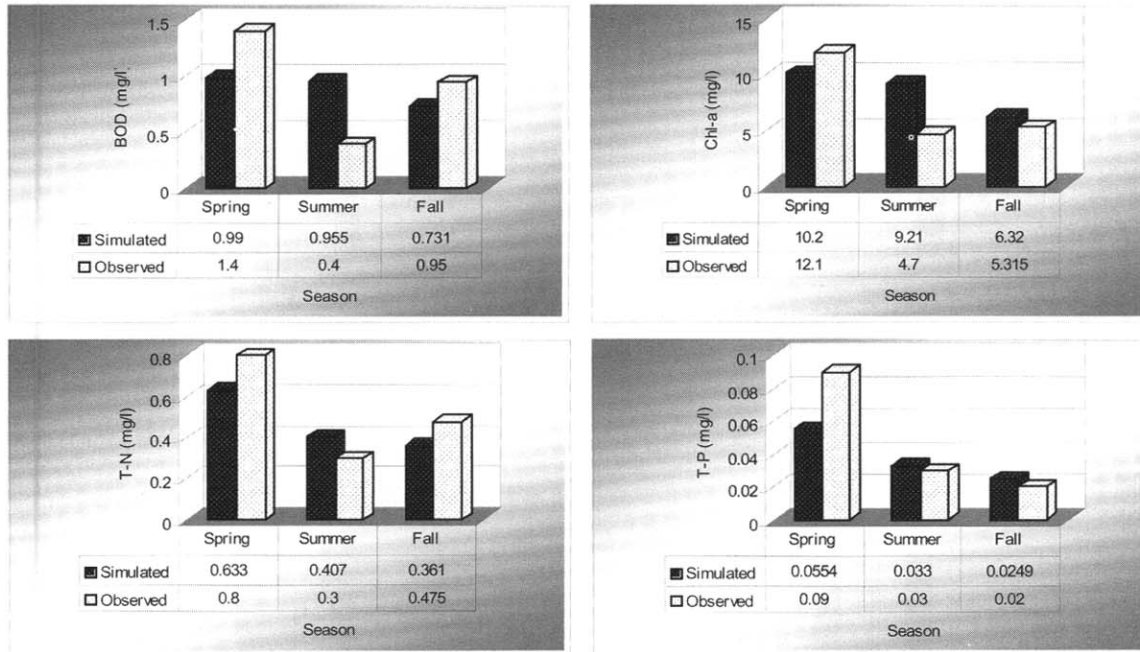


Fig. 5. Comparisons between observed and simulated values of BOD<sub>5</sub>, Chl-a, T-N, and T-P in segment 2.

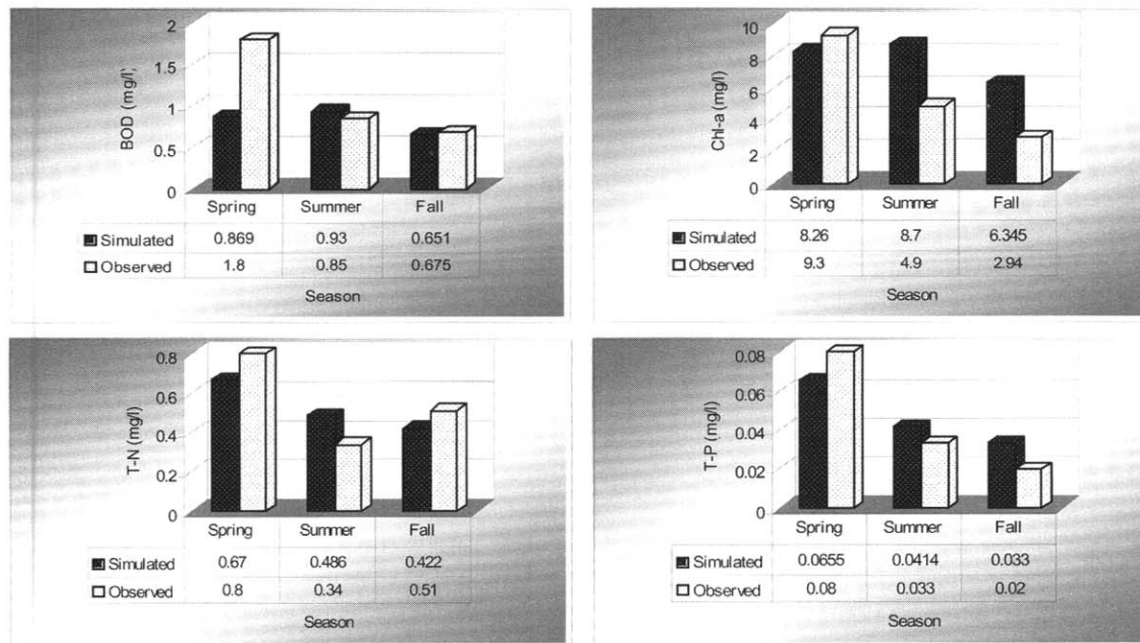


Fig. 6. Comparisons between observed and simulated values of BOD<sub>5</sub>, Chl-a, T-N, and T-P in segment 3.

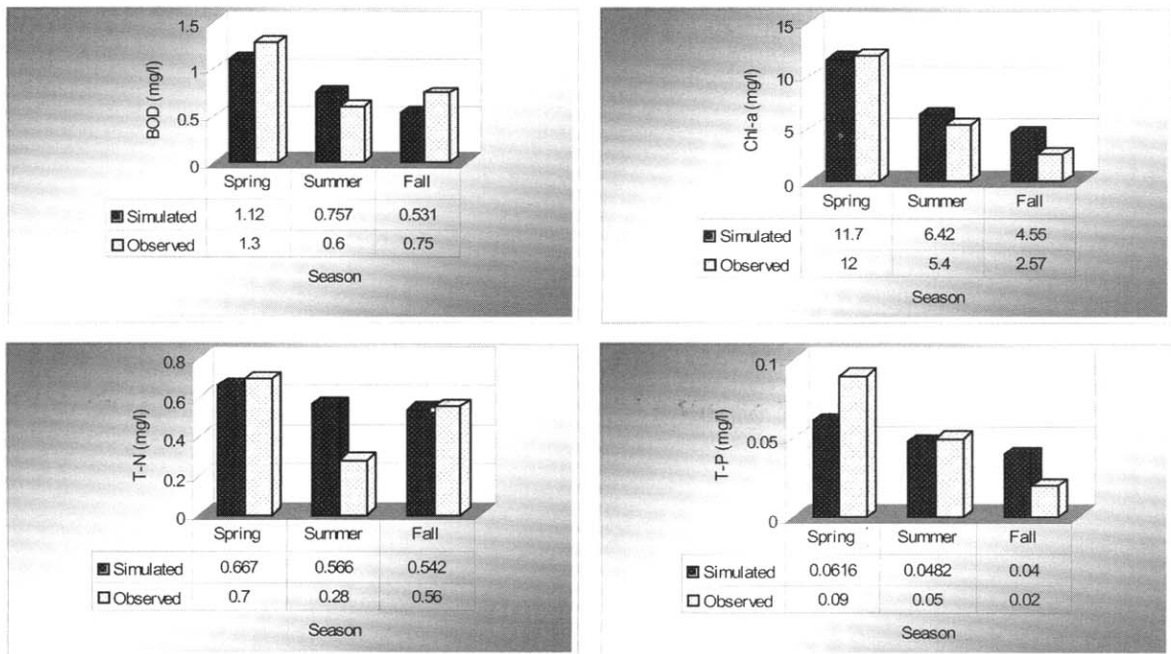


Fig. 7. Comparisons between observed and simulated values of BOD<sub>5</sub>, Chl-a, T-N, and T-P in segment 5.

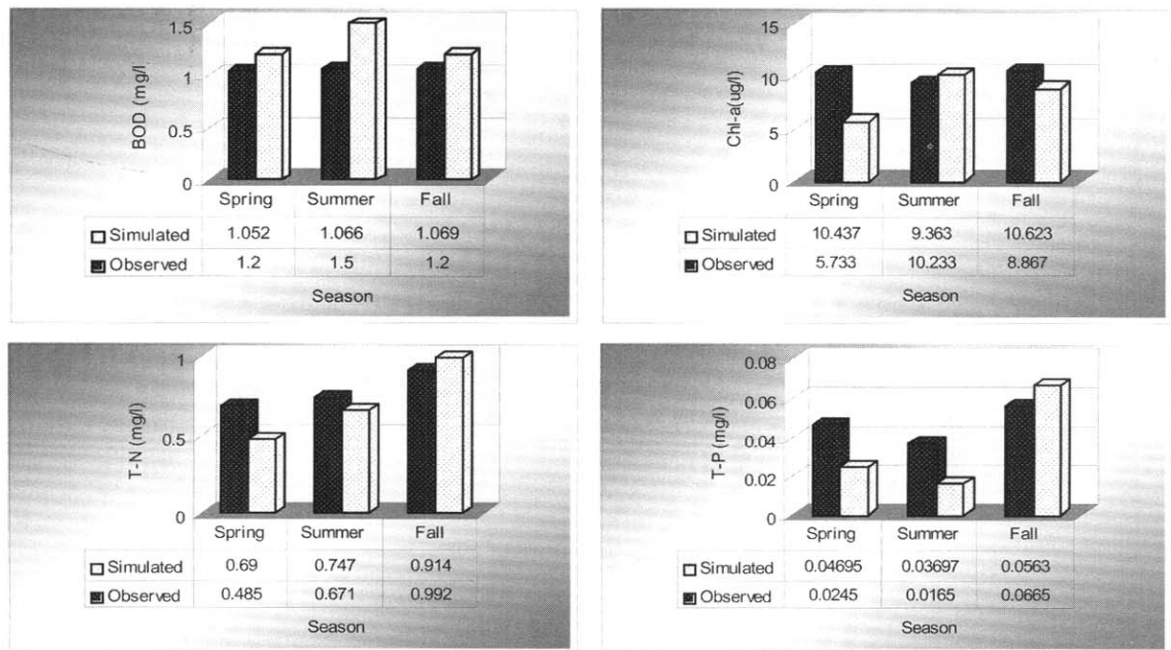


Fig. 8. Comparisons between observed and simulated values of BOD<sub>5</sub>, T-N, and T-P in segment 3.

3.2. 모형의 검증

본 연구에서는 경천저수지의 모델변수를 검증하기 위하여 Segment 3에서의 BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P의 실측치와 예측치의 값들에 대한 비교는 봄, 여름, 가을로 나누어 계절별로 하였다. 봄은 3, 4, 5월의 수질평균값, 여름은 6, 7, 8월의 수질평균값, 가을은 9, 10, 11월의 수질평균값으로 하여 실측치와 예측치를 비교하였다. 예측치의 T-N값은 유기질소, 암모니아성 질소 및 질산성 질소등의 값을 합한 것이며,

T-P값은 유기인과 무기 인산염등의 값을 더한 값이다. 계절별 상관관계수 범위를 보면 BOD<sub>5</sub> 0.93, T-N 0.94, T-P 0.81, 그리고 Chl-a의 상관관계는 0.80이었다. Segment 3에서의 BOD<sub>5</sub>와 T-N, T-P는 실측치와 계산치가 계절별 평균값으로 본 결과, BOD<sub>5</sub>는 예측치가 다소 낮게 추정되었고, T-N 및 T-P는 봄과 여름철에 예측치가 실측치 보다 다소 높게 추정되었지만 비교적 잘 일치 한 것으로 평가되었다. 모형의 검증결과는 Fig. 8에 나타내었다.

**Table 3.** Correlation between simulated and observed values for calibration

Item	SEG.1	SEG.2	SEG.3	SEG.5
BOD	y = 0.9937x-0.0882 R2 = 0.91	y = 0.9197x+0.1363 R2 = 0.65	y = 1.0197x+0.1395 R2 = 0.75	y = 0.9758x+0.1628 R2 = 0.88
Chl-a	y = 1.0842x-0.8795 R2 = 0.96	y = 1.051x-1.1354 R2 = 0.796	y = 1.0401x-1.7546 R2 = 0.82	y = 1.0809x-0.5902 R2 = 0.98
T-N	y = 1.0667x-0.0392 R2 = 0.96	y = 1.0315x+0.0373 R2 = 0.90	y = 1.0145x+0.0223 R2 = 0.86	y = 0.9869x-0.0314 R2 = 0.82
T-P	y = 0.9969x-0.0031 R2 = 0.99	y = 1.1177x-0.0008 R2 = 0.89	y = 1.1259x-0.0088 R2 = 0.94	y = 1.1159x-0.0083 R2 = 0.76

**Table 4.** BOD, T-N, and T-P loading (2002년)

(Unit : kg/day)

Drainage basin	Pollutant loads Generated			Pollutant loads discharged		
	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
W-1	928.8	239.3	72.7	65.81	57.92	5.39
W-2	3,766	952.5	268.2	318.77	235.35	21.21
W-3	500.1	123.0	37.7	38.60	33.73	3.00
W-4	73.8	34.9	3.9	37.04	26.67	2.09

**Table 5.** Runoff ratio for BOD, T-N, and T-P

(Unit : %)

Item	Drainage basin	Month												Mean
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
BOD	W-1	2.6	-	-	7.2	-	-	-	22.4	-	5.1	1.1	1.0	6.6
	W-2	33.8	-	-	28.5	-	-	-	63.7	-	9.5	9.4	9.4	25.7
T-N	W-1	1.9	-	-	6.8	-	-	-	18.0	-	6.1	2.1	2.0	6.2
	W-2	35.0	-	-	34.8	-	-	-	62.9	-	7.9	15.4	15.4	28.6
T-P	W-1	2.7	-	-	9.6	-	-	-	19.2	-	2.2	3.8	0.5	6.3
	W-2	52.4	-	-	52.0	-	-	-	67.2	-	4.9	7.6	7.6	32.0

3.3. 오염부하량

각 배수구역 W-1, W-2, W-3, W-4에서 발생하는 2002년 경천저수지유역의 오염원은 인구 3,712명, 한우 5,972마리, 돼지 1,140마리, 닭 319,000마리, 토지로는 전 504ha, 답 698ha, 임야 4,688ha, 대지55ha로 나타났고 산업으로 인한 오염은 없는 것으로 나타났다. BOD, T-N, T-P에 대한 발생부하량과 배출부하량은 1999년 환경부고시자료에 의한 배출원단위를 적용한 결과 Table 4와 같다.

그리고 저수지내로 유입되는 유입부하량은 각 하천이나 지천별로 저수지의 segment 1, 2, 4로 유입된다. 이 때 유달율은 실측유입부하량과 배출부하량으로부터 월별유달율과 연평균 유달율을 구하였으며 Table 5와 같다. 경계조건 수질은 계산된 유달율에 배출부하량을 곱하였으며, 이 때 수질항목별 경계면에서의 입력부하량 계산은 T-N, T-P농도에 대한 NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, Organic-N, PO<sub>4</sub>-P, Organic-P의 항목별 비율에다가 T-N, T-P의 유입부하량을 곱하여 월별 수질항목별 부하량으로 입력하였다.

3.4. 수질예측

본 연구의 대상 저수지인 경천저수지는 상수원 보호구역으로 축산에 의한 각종 법규제로 축사 신축이 제한되어 있다. 그러므로 무허가 축사 및 소규모 축사들이 많아 질 수 있다. 이 경우 대부분 축산 분뇨 처리시설을 갖추지 않고 있으므로 가축의 증가는 축산폐수에 의한 오염부하량이 증가할 것이므로, 이 유역에서 발생하는 오염원중 오염원의 기여율이 가장높은 가축의 증감에 의해 발생하는 수질 변화를 예측하고자 현재에 비해 가축에 의한 부하량이 50% 감소, 50% 증가되었을 때 예측수질항목 농도가 어느 정도 변화하는가를 모의하였다. 예측결과를 보면, 가축에 의한 오염부하량이 현재보다 50% 감소될 경우, segment 2와 3에서 월별 예측된 수질항목 평균농도 범위는 BOD<sub>5</sub> 0.020~0.14mg/ℓ, T-N 0.022~0.07mg/ℓ, T-P 0.005~0.029mg/ℓ의 범위로 농도가 감소되었다. 가축의 오염부하량이 현재보다 50% 증가될 경우, segment 2와 3에서 BOD<sub>5</sub> 0.02~0.15mg/ℓ, T-N 0.029~0.08mg/ℓ, T-P 0.011~0.029mg/ℓ의 범위로 농도가 증가되어 변화하는 것으로 예측되었다.

그리고 2002년과 비교한 2010년의 장래예측은 segment 2



Table 6. Mean results of predicted values in segment 2, 3

Item (mg/ℓ)	SEG. 2				SEG. 3			
	50%Dec.	Present (2002년)	50%Inc.	2010년	50%Dec.	Present (2002년)	50%Inc.	2010년
BOD	1.29	1.39	1.48	2.00	1.08	1.15	1.23	1.68
T-N	0.77	0.83	0.89	1.29	0.75	0.80	0.86	1.23
T-P	0.068	0.086	0.105	0.103	0.069	0.085	0.103	0.102

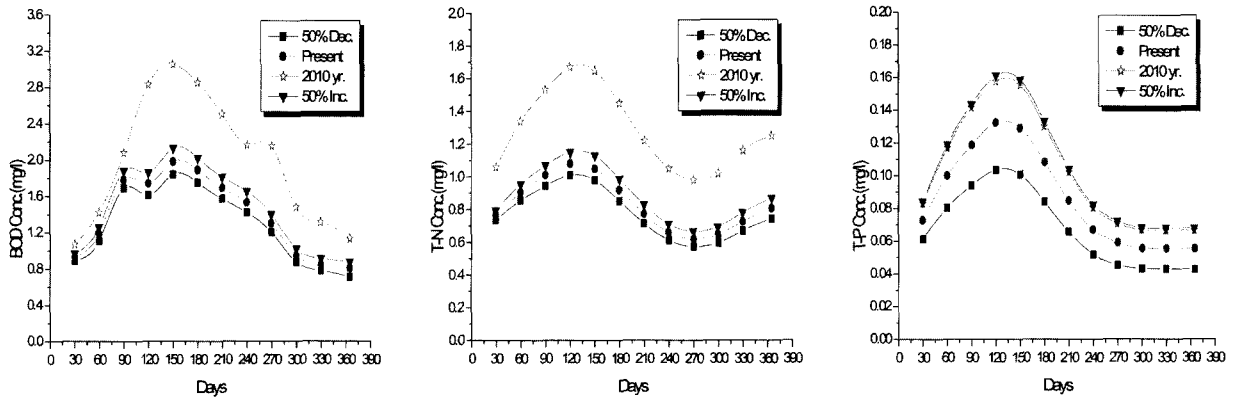


Fig. 9. Results of predicted values in segment 2.

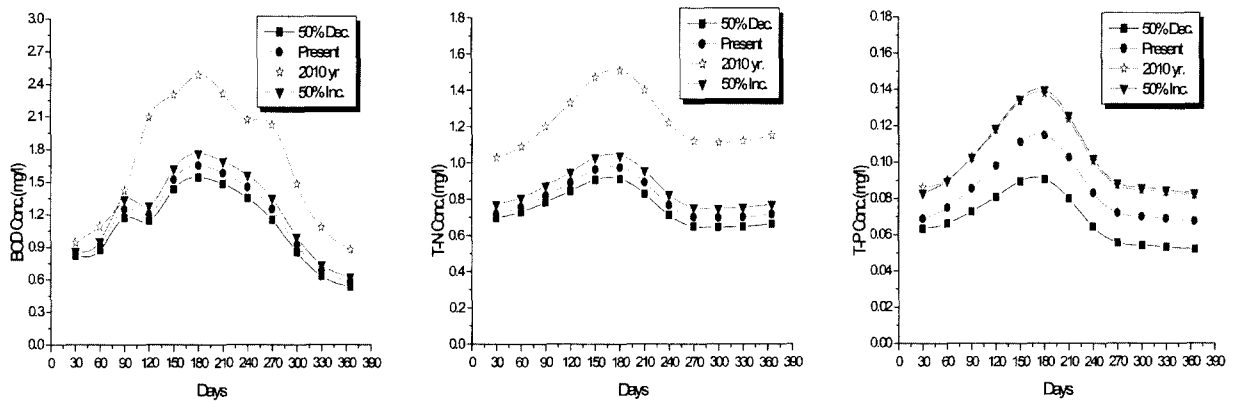


Fig. 10. Results of predicted values in segment 3.

와 3에서 BOD5 0.01~1.09mg/ℓ, T-N 0.294~0.59mg/ℓ, T-P 0.01~0.026mg/ℓ의 범위로 증가되어 변화하는 것으로 예측되었다. Table 6은 segment 2와 3에서의 평균 예측결과이며, 예측결과에 대한 그림은 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다.

Vollenweider(1968)는 인과 질소 농도를 가지고 호수의 영양상태를 정량적으로 분류를 시도하였으며, 몇몇 지역호수의 화학분석 결과에 기초하여 5단계의 영양상태 분류를 Table 7과 같이 제시하였다.

2002년과 2010년의 부하량으로 모의하여 Vollenweider(1968)에 의한 호수의 영양상태를 평가한 결과, 2002년은 저수지내의 segment 2와 3에서 T-N농도는 평균 0.82mg/ℓ로서 부-과영양상태이며, T-P농도도 평균 0.086mg/ℓ로서 부-과영양상태로 평가 되었다. 2010년은 저수지내의 segment 2와 3에서 T-N농도는 평균 1.26mg/ℓ로서 부-과영양상태이며, T-P농도는 평균 0.103mg/ℓ로서 과영양상태 초기

Table 7. Trophic state division as T-N and T-P of Vollenweider(1968)

Trophic state	T-P(mg/ℓ)	T-N(mg/ℓ)
Oligotrophic	< 0.005	< 0.20
Oligo-mesotrophic	0.005 ~ 0.01	0.20 ~ 0.40
Meso-eutrophic	0.01 ~ 0.03	0.30 ~ 0.65
Eu-hypertrophic	0.03 ~ 0.10	0.50 ~ 1.50
Hypertrophic	> 0.10	> 1.50

자료 : 신흥문화사(1995), 담수의 부영양화

로 평가되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 WASP5/WASP Builder를 이용하여 농촌의 소유역 저수지수질을 모의한 결과는 다음과 같다.

1. 각 Segment에서 봄, 여름, 가을로 보정한 결과, BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P, Chlorophyll-a의 실측치와 계산치의 값들에 대한 상관관계 범위를 보면 BOD<sub>5</sub>는 0.63~0.90, T-N은 0.81~0.97, T-P는 0.75~0.98, 그리고 Chlorophyll-a은 0.77~0.98이었다.
2. Segment 3에서의 계절별 모델변수의 검증결과, BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P의 실측치와 예측치의 값들에 대한 상관관계를 보면 BOD<sub>5</sub> 0.93, T-N 0.94, T-P 0.81, 그리고 Chl-a은 0.80이었다
3. 경천저수지 유역내에서 발생하는 오염원별 기여율을 보면 가축에 의한 발생량이 BOD의 경우 94.4%로 가장 높고, 다음이 인구 3.4%, 토지 2.2% 순이었고, T-N의 경우는 가축 81.6%, 토지 14.8%, 인구 3.6% 순이며, T-P의 경우는 T-N과 같은 경향을 보였다.
4. 가축에 의한 오염부하량이 현재보다 50% 감소될 경우, segment 2와 3에서 월별 예측된 수질항목 평균농도 범위는 BOD<sub>5</sub> 0.020~0.14mg/ℓ, T-N 0.022~0.07mg/ℓ, T-P 0.005~0.029mg/ℓ의 범위로 농도가 감소되었다. 가축의 오염부하량이 현재보다 50% 증가될 경우, segment 2와 3에서 BOD<sub>5</sub> 0.02~0.15mg/ℓ, T-N 0.029~0.080mg/ℓ, T-P 0.011~0.029mg/ℓ의 범위로 농도가 증가되어 변화하는 것으로 예측되었다.  
그리고 2002년과 비교한 2010년의 장래예측은 segment 2와 3에서 BOD<sub>5</sub> 0.01~1.09mg/ℓ, T-N 0.294~0.59mg/ℓ, T-P 0.01~0.026mg/ℓ의 범위로 증가되어 변화하는 것으로 예측되었다.
5. 2002년과 2010년의 부하량으로 모의하여 Vollenweider (1968)에 의한 호수의 영양상태를 평가한 결과, 2002년은 저수지내의 segment 2와 3에서 T-N농도는 평균 0.82 mg/ℓ로서 부-과영양상태이며, T-P농도도 평균 0.086mg/ℓ로서 부-과영양상태로 평가되었다. 2010년은 저수지내의 segment 2와 3에서 T-N농도는 평균 1.26mg/ℓ로서 부-과영양상태이며, T-P농도는 평균 0.103mg/ℓ로서 과영양상태 초기로 평가되었다.  
전반적으로 수질모의 결과, 실측농도를 잘 반영하는 것으로 평가되나, 저수지 내부 및 외부 오염부하의 시간적, 공간적 분포는 연속적인 추가의 조사를 통하여 수정 및 보완되어야 할 것이다.

## 사 사

본 논문은 농림부의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 기상청, <http://www.kma.go.kr/minwon/minwon.jsp>
- 신동석, 권순국, WASP5 모형을 적용한 북한천의 수질 예측, *한국환경농학회지*, **16**(3), pp. 233-238 (1997).
- 이중호, WASP5에 의한 대청호 수질모델링, *환경영향평가*, **8**(1), pp. 93-105 (1999).
- 익산농업기반공사, 수리자료, (1990~2003).
- 전라북도, 가두리 양식장 실태조사 보고서-경천 및 대아 저수지의 가두리 양식장과 비점오염원이 수질에 미치는 영향조사 (1992).
- 최영길, 한명수, 안태영, 광노태, *담수의 부영양화*, 신평문화사, p. 194 (1995).
- Ambrose, Robert B. and James L. Martin. The Water Quality Analysis Simulation Program, WASP5 : Part A Model Documentation. Environmental Research Laboratory, U. S. EPA. (1993).
- Ambrose, Robert B. and James L. Martin. The Water Quality Analysis Simulation Program, WASP5 : Part B The WASP5 Input Dataset, Environmental Research Laboratory, U. S. EPA. (1993).
- Ambrose, Robert B. and James L. Martin. The Dynamic Estuary Model Hydrodynamics Program, DYNHYD5 Model Documentation and User Manual, Environmental Research Laboratory, U. S. EPA. (1993).
- Auer, M. T., and Forrer, B. E., Development and Parameterization of a Kinetic Framework for Modeling Light-and Phosphorus-Limited Phytoplankton Growth in Cannonsville Reservoir, *Lake and Reservoir Management*, **14**(2-3), pp. 290-300 (1998).
- Integrated Decision Support Group, WASP Builder Version 1.2 : South Platte Mapping and Analysis Program. Colorado, USA. (2000).