



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권으로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

WASP 7.2와 신경망모형을 이용한 낙동강의 수질모의 및 예측



2008년 2월

부경대학교 대학원

토목공학과

최 정 민

공 학 석 사 학 위 논 문

WASP 7.2와 신경망모형을 이용한 낙동강의 수질모의 및 예측

지도교수 이 상 호

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2008년 2월

부경대학교 대학원

토목공학과

최 정 민

최정민의 공학석사 학위논문을 인준함.

2008년 2월 26일



주 심 공 학 박 사 손 인 식 (인)

위 원 공 학 박 사 이 종 섭 (인)

위 원 공 학 박 사 이 상 호 (인)

목 차

표 목차	xiii
그림 목차	x
기호 목록	xiv
Abstract	xx

1. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구동향	3
1.2.1 WASP모형	3
1.2.2 신경망모형	4
1.3 연구의 내용 및 범위	6
2. 수질모형과 신경망모형	7
2.1 수질모형의 선정	7
2.2 WASP(Water Quality Analysis Simulation Program)모형의 이론 ·	10
2.2.1 기본 방정식	12
2.2.2 질량보존 방정식	13
2.2.3 예측수질항목의 반응 및 상호 관계식	14
2.3 신경망(Artificial Neural Network) 모형의 이론	20
2.3.1 신경망의 배경	20

목 차 (계속)

2.3.2 신경망의 분류	21
2.3.3 다층 퍼셉트론(Muti-Layer Perceptron)과 역전파 알고리즘 (Back-propagation Algorithm)	22
3. WASP모형을 이용한 수질모의	25
3.1 수질모의 조사지점 및 입력자료 구축	25
3.1.1 수질모의 조사지점	25
3.1.2 입력자료 구축	26
3.1.3 동물성 플랑크톤과 식물성 플랑크톤의 관계	36
3.1.4 WASP모형의 매개변수 추정	37
3.2 동물성 플랑크톤을 이용한 수질모의	39
3.2.1 모형의 보정	39
3.2.2 모의된 Chl-a와 입력 자료의 비교	52
3.2.3 모형의 검증	55
3.2.4 동물성 플랑크톤 개체수와 식물성 플랑크톤 사멸률을 이용한 수질모의 비교	66
3.3 민감도 분석	68
3.3.1 상수의 민감도 분석 결과	72
3.3.2 시간함수의 민감도 분석 결과	77
4 신경망모형을 이용한 동물성 플랑크톤 예측	81
4.1 동물성 플랑크톤의 예측결과 비교	81
4.1.1 학습 기간에 따른 동물성 플랑크톤 예측	81

목 차 (계속)

4.1.2 학습 횟수에 따른 예측결과 비교	84
4.1.3 기온에 의한 동물성 플랑크톤 예측	87
4.2 동물성 플랑크톤 예측에 의한 수질모의	89
4.3 예측된 동물성 플랑크톤 개체수, 관측된 동물성 플랑크톤 개체수와 식물성 플랑크톤 사멸률을 이용한 Chl-a의 비교	100
 5. 기온 변화에 따른 수질의 단기 예측	 102
5.1 수질의 단기 예측 방법	102
5.2 수질의 단기 예측 결과	103
 6. 결론 및 향후 과제	 113
 참고문헌	 116
 감사의 글	 121

표 목차

표 2.1 지표수 수질 모형에 대한 기본 정보 (Ambrose 등, 1996)	8
표 2.2 지표수 수질 모형에서 변수와 수질반응 과정 (Ambrose 등, 1996)	9
표 2.3 Eutrophication 부 모형의 복잡도와 수질항목 (한국수자원학회, 1999)	12
표 3.1 낙동강 분류 및 지류의 수위-유량 곡선식	30
표 3.2 WASP모형에 입력되는 수질 및 기상자료	31
표 3.3 모의에 사용된 구간의 수리계수	33
표 3.4 물금 지점의 출현 종별 섭식률 (Kim 등, 2000))	36
표 3.5 WASP모형의 매개변수 추정	37
표 3.6 모형 보정의 결과를 비교하기 위한 통계량	41
표 3.7 모형 검증 결과를 비교하기 위한 통계량	55
표 3.8 Chl-a의 모의결과를 비교하기 위한 통계량	66
표 3.9 모형에 사용된 매개변수의 민감도	69
표 4.1 학습기간에 의해 예측된 동물성 플랑크톤 통계량	82
표 4.2 학습횟수에 의해 예측된 동물성 플랑크톤 통계량	84
표 4.3 기온과 수온에 의해 예측된 동물성 플랑크톤 통계량	87
표 4.4 동물성 플랑크톤 예측에 의한 수질항목의 통계량	89
표 4.5 세 경우에 의해 모의된 Chl-a의 통계량	100
표 5.1 예측 간격에 따른 Chl-a의 통계량	103
표 5.2 예측 간격에 따른 DO의 통계량	104
표 5.3 예측 간격에 따른 BOD의 통계량	105
표 5.4 예측 간격에 따른 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 통계량	106
표 5.5 예측 간격에 따른 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 통계량	107

표 목차 (계속)

표 5.6 예측 간격에 따른 Organic-N의 통계량	108
표 5.7 예측 간격에 따른 Total-N의 통계량	109
표 5.8 예측 간격에 따른 PO ₄ -P의 통계량	110
표 5.9 예측 간격에 따른 Organic-P의 통계량	111
표 5.10 예측 간격에 따른 Total-P의 통계량	112



그림 목차

그림 1.1 물금의 Chl-a 농도	6
그림 2.1 Eutrophication 부 모형에서 구성물질간의 상호작용 (Ambrose 등, 2004)	11
그림 2.2 고정된 패턴을 위한 신경망의 분류	21
그림 2.3 다층 퍼셉트론의 구조	22
그림 3.1 수질모의 조사지점	25
그림 3.2 모의 구간의 모식도	26
그림 3.3 낙동강 본류 및 지류의 수위-유량 곡선	28
그림 3.4 물금의 Chl-a 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)	43
그림 3.5 물금의 DO 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)	43
그림 3.6 물금의 BOD 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)	45
그림 3.7 물금의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)	45
그림 3.8 물금의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)	47
그림 3.9 물금의 Organic-N 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)	47
그림 3.10 물금의 Total-N 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)	49
그림 3.11 물금의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)	49
그림 3.12 물금의 Organic-P 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)	51
그림 3.13 물금의 Total-P 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)	51
그림 3.14 강우량, 유량, 동물성 플랑크톤 개체수와 Chl-a의 비교	53
그림 3.15 수온, 일사량, 일조율과 Chl-a의 비교	54
그림 3.16 물금의 Chl-a 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)	57
그림 3.17 물금의 DO 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)	57
그림 3.18 물금의 BOD 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)	59
그림 3.19 물금의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)	59

그림 목차 (계속)

그림 3.20 물금의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)	61
그림 3.21 물금의 Organic-N 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)	61
그림 3.22 물금의 Total-N 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)	63
그림 3.23 물금의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)	63
그림 3.24 물금의 Organic-P 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)	65
그림 3.25 물금의 Total-P 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)	65
그림 3.26 동물성 플랑크톤 개체수와 식물성 플랑크톤 사멸률을 이용한 Chl-a의 비교	67
그림 3.27 매개변수를 10 % 증가 시켰을 때 민감도	70
그림 3.28 매개변수를 10 % 감소 시켰을 때 민감도	71
그림 3.29 Chl-a 성장률의 민감도	73
그림 3.30 동물성 플랑크톤 섭식률의 민감도	73
그림 3.31 유기인 반포화 상수의 민감도	75
그림 3.32 인 변화율에 대한 민감도	75
그림 3.33 질소 변화율에 대한 민감도	76
그림 3.34 유량 변화에 대한 민감도	78
그림 3.35 수온 변화에 대한 민감도	78
그림 3.36 일사량 변화에 대한 민감도	80
그림 3.37 일조율 변화에 대한 민감도	80
그림 4.1 동물성 플랑크톤의 관측값과 예측값 비교 (10개의 매개변수로 2년간 학습)	83
그림 4.2 동물성 플랑크톤의 관측값과 예측값 비교 (4개의 매개변수로 11년간 학습)	83
그림 4.3 학습 횟수 1,000을 사용한 예측	85

그림 목차 (계속)

그림 4.4 학습 횟수 5,000을 사용한 예측	85
그림 4.5 학습 횟수 10,000을 사용한 예측	86
그림 4.6 기온과 수온에 의한 동물성 플랑크톤 예측결과	88
그림 4.7 물금의 Chl-a 관측값과 모의값 비교 (동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)	91
그림 4.8 물금의 DO 관측값과 모의값 비교 (동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)	91
그림 4.9 물금의 BOD 관측값과 모의값 비교 (동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)	93
그림 4.10 물금의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 관측값과 모의값 비교 (동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)	93
그림 4.11 물금의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 관측값과 모의값 비교 (동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)	95
그림 4.12 물금의 Organic-N 관측값과 모의값 비교 (동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)	95
그림 4.13 물금의 Total-N 관측값과 모의값 비교 (동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의))	97
그림 4.14 물금의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 관측값과 모의값 비교 (동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)	97
그림 4.15 물금의 Organic-P 관측값과 모의값 비교 (동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의))	99
그림 4.16 물금의 Total-P 관측값과 모의값 비교 (동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)	99
그림 4.17 세 경우에 의해 모의된 물금의 Chl-a 비교	101

그림 목차 (계속)

그림 5.1 물금의 Chl-a 관측값과 예측값 비교	103
그림 5.2 물금의 DO 관측값과 예측값 비교	104
그림 5.3 물금의 BOD 관측값과 예측값 비교	105
그림 5.4 물금의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 관측값과 예측값 비교	106
그림 5.5 물금의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 관측값과 예측값 비교	107
그림 5.6 물금의 Organic-N 관측값과 예측값 비교	108
그림 5.7 물금의 Total-N 관측값과 예측값 비교	109
그림 5.8 물금의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 관측값과 예측값 비교	110
그림 5.9 물금의 Organic-P 관측값과 예측값 비교	111
그림 5.10 물금의 Total-P 관측값과 예측값 비교	112



기호 목록

Latin Uppercase

A	단면적(m^2)
B	평균하폭(m)
C	오염물질의 농도(mg/L 또는 g/m^3)
C_1	암모니아성 질소의 농도($mg\ N/L$)
C_2	질산성 질소의 농도($mg\ N/L$)
C_3	인산인의 농도($mg\ P/L$)
C_4	탄소로 표시된 식물성 플랑크톤의 농도($mg\ C/L$)
C_5	탄소성 BOD의 농도($mg\ O_2/L$)
C_6	용존산소의 농도($mg\ O_2/L$)
C_7	유기질소의 농도($mg\ N/L$)
C_8	유기인의 농도($mg\ P/L$)
C_s	포화 용존산소 농도($mg\ O_2/L$)
D	수체의 깊이(m)
D_{P1}	식물성 플랑크톤 소멸률(day^{-1})
Err	패턴 p 에 대한 각 뉴런의 오류 합
G_{P1}	식물성 플랑크톤 성장률(day^{-1})
K_{BOD}	최대 산소농도에 관한 반포화상수($mg\ O_2/L$)
K_{mN}	최대 질소농도에 대한 반포화상수($mg\ N/L$)
K_{NO3}	탈질산화과정의 최대산소농도에 관한
K_{mPC}	반포화상수($mg\ O_2/L$)

기호 목록 (계속)

K_{mPC}	인 순환과정에서 최대 식물성 플랑크톤농도에 관한 반포화상수(mg C/L)
K_{NIT}	질산화 과정의 최대산소농도에 관한 반포화상수 (mg O ₂ /L)
N	관측자료의 수
NET	은닉층 또는 출력층에서 뉴런의 출력 계산을 위한 활성화 함수
NSE	Nash-Sutcliffe 효율성 지수(Nash-Sutcliffe efficiency)
$O_{p,k}$	출력층의 뉴런 k 의 출력
P_{NH3}	식물성 플랑크톤의 암모니아성 질소 흡입선도
$PBIAS$	평균 편차의 비율(percent bias)
PME	지속 모형 효율성 지수(persistence model efficiency)
Q	유량 (m ³ /sec)
$RMSE$	제곱근 평균오차(root mean square error)
U	수로축에 따른 유속(m/s)
U_x, U_y, U_z	종방향, 횡방향, 연직방향 유속(m/d)
E_x, E_y, E_z	종방향, 횡방향, 연직방향 확산계수(m ² /d)
S_L	오염물 부하율 (g/m ³ /d)
S_B	표층수, 저층수 및 하상과 대기를 포함한 경계 부하율 (g/m ³ /d)
S_K	총 동역학적 변형률(g/m ³ /d)
SOD	하상퇴적물 산소 요구량(mg/m ² /day)

기호 목록 (계속)

V	평균유속(m/sec)
V_{S3}	유기물의 침강속도(m/day)
V_{S4}	식물성 플랑크톤 침강속도(m/day)
$Z_{p,j}$	은닉층의 뉴런 j 의 출력



기호 목록 (계속)

Latin Lowercase

a	유속계수(coefficient for velocity)
a_{NC}	탄소으로 표시된 식물성 플랑크톤의 질소 변화율 (mg C/L)
a_{OC}	탄소의 산소 변화율(mg O ₂ /mg C)
a_{PC}	탄소로 표시된 식물성 플랑크톤의 인 변화율 (mg P/mg C)
b	유속지수(exponent for velocity)
c	수심계수(coefficient for depth)
d	수심지수(exponent for depth)
$d_{p,k}$	뉴런 k 에서 패턴 p 에 대응하는 목표 값
e	하폭계수(coefficient for width)
f	하폭지수(exponent for width)
f_{D3}	수체내의 인산 인의 비율
f_{D5}	수체내의 용해 CBOD의 비율
f_{D7}	수체내 용존 유기질소의 비율
f_{D8}	용해유기인의 비율
f_{ON}	유기질소 변환과정에서 식물성 플랑크톤 사멸-호흡 비율
f_{OP}	Chl-a의 사체가 유기인으로 변하는 비율
h	수위(m)
k_d	20 ℃에서 재포기계수(day ⁻¹)
k_{1D}	식물성 플랑크톤의 분해율(day ⁻¹)

기호 목록 (계속)

k_{12}	20 ℃에서 질산화율(day^{-1})
k_{2D}	20 ℃에서 탈질산화율(day^{-1})
k_{71}	20 ℃에서 유기질소의 가수분해율(day^{-1})
k_{83}	20 ℃에서 용해 유기인의 가수분해율 (day^{-1})
q^{mean}	관측농도의 평균($\mu\text{g/L}$, mg/L)
q_t^{obs}	관측농도($\mu\text{g/L}$, mg/L)
q_{t-1}^{obs}	$t-1$ 시간의 관측농도($\mu\text{g/L}$, mg/L)
q_t^{sim}	t 시간의 모의농도($\mu\text{g/L}$, mg/L)
t	시간(sec, d)
v_{ji}	입력층 뉴런 i 와 은닉층 뉴런 j 사이의 연결 가중치
w_{kj}	은닉층 뉴런 j 와 출력층 뉴런 k 사이의 연결 가중치
x	수로축에 따른 거리(m)
$x_{p,i}$	모수의 입력 값

기호 목록 (계속)

Greek Lowercase

α_g	중력가속도(m/sec ²)
α_f	마찰가속도(m/sec ²)
α_w	바람에 의한 응력가속도(m/sec ²)
λ	활성화 함수 계수
$\theta_{12}, \theta_{71}, \theta_{83}, \theta_D$	온도보정 계수



Water Quality Simulation and Forecast in the Nakdong River
Using WASP 7.2 and Artificial Neural Network Model

Jung Min Chloi

Department of Civil Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Mulgeum, a downstream area in the Nakdong River, is exceeding in its standard of eutrophication during almost period of 2003~2005. This study is to simulate and predict the eutrophication of Mulgeum through WASP 7.2 model. For the simulation of eutrophication, the observed number of zooplankton is inputted and the result is compared with the observed results. And, through the Artificial Neural Network model, the zooplankton number is forecasted, and then the short term change of water quality is forecasted by inputting the air temperature data from the meteorological administration. As a result of the statistical analysis, the PBIAS of simulation by inputting the death rate of phytoplankton was -39.95 % and the PBIAS of simulation by inputting the number of zooplankton was 18.87 %. The simulation by inputting the number of zooplankton turned out more similar to the observed value. While the observed value of 2005 was fixed as initial condition, the number of zooplankton was forecasted through the Artificial neural network model by inputting DO, NO₃-N, PO₄-P, and air temperature data. Then, the short term change of water quality after 1~3 days was forecasted by inputting the air temperature from the meteorological administration instead of water temperature.

As a result of forecast, the eutrophic materials in the water quality items such as Chlorophyll-A, total Nitrogen, and total Phosphorus were always simulated as appropriate to the observed values during the forecast period. It is considered that the water quality simulation by inputting the observed data in the water quality items, the forecasted zooplankton number, and air temperature data from the meteorological administration into WASP 7.2 model will be meaningful water quality forecast in the Nakdong River.



1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

낙동강은 부산, 경남, 경북 유역 주민들의 상수원수 및 농업·공업용수로 사용되고 있으며, 부산시뿐만 아니라 4개 시도의 상수원으로 용수량의 90 % 이상이 취수원이다(김미숙, 2002).

그러나 중·상류지역에 대구 같은 대도시가 있고 각종 공업단지가 들어서 있기 때문에 하·폐수의 유입량이 증가함에 따라 하류지역의 수질이 1980년대 이후로 해마다 악화되고 있다(신성교 등, 1996). 낙동강 수질 개선을 위하여 1986년도부터 대구지역에 하수처리시설을 증설하기 시작한 이후로 낙동강의 주요오염원인 금호강의 수질이 1984년에 BOD가 111.0 mg/L이었던 것이 1989년도에는 47.0 mg/L, 1995년에는 8.7 mg/L로 현저히 개선되었다. 그러나 부산시의 상수원 취수장이 있는 하류 물금수역에서는 수질이 개선되지 않고 1994년 이후로는 오히려 수질이 점차로 악화되고 있다(김미숙 등, 2002).

낙동강은 중·하류의 지류에 건설된 다목적 댐과 1987년 건설된 하구둑에 의한 인위적인 유량 조절과 하류에 밀집된 취수원에의 수두 확보로 인해 수괴의 정체가 가속화 되어 갈수기에는 저수지 성향을 띄는 ‘강-저수지 혼합형태(river-reservoir hybrid type)’의 특성을 보이고 있다. 그리고 공단이 밀집한 중류에서 처리되지 않은 영양물질의 지속적인 유입으로 과영양 단계를 넘어선 심각한 부영양화 상태에 있다(주기재 등, 1997).

부영양화는 영양염, 특히 질소, 인 및 유기영양물질의 과도한 유입으로 인해 식물성 플랑크톤이 급격히 번식되는 현상을 말한다(Jeffris와 Mills, 1990). 부영양화의 개념은 낮은 영양상태의 빈영양과 중영양에 대한 상대

적인 말로 정제된 수역에 대해서 주로 사용되어져 왔다(이상희, 1999). 그러나 산업이 발달하고 수계로의 오염배출량이 늘어나면서 부영양화의 속도가 빨라졌으며 정제수역뿐만 아니라 유속이 느린 하천에서도 부영양화 현상이 나타나고 있다(이종남과 정종문, 1997).

낙동강 전역에서 가장 많은 물리·화학·생태학적 변화가 진행된 지역은 하구둑 상부지역이다. 하구둑 건설이후, 담수화 된 하구둑 상부에서는 부영양화가 가속화되었다. 수질의 악화는 물론 강 생태계의 구조와 기능의 변화까지 초래되었다. 지난 7~8년 간 낙동강 하류 지역은 갈수기 식물성 플랑크톤 군집의 대거 번성으로 인한 부영양화로 연중 심각한 수질 오염문제를 야기하고 있다. 특히, 1년 중 6개월 이상 *Microcystis*와 *Stephanodiscus*로 대표되는 식물성 플랑크톤의 수화현상(water bloom)이 관찰되어 낙동강 하류 지역에 있는 많은 취수원(물금, 매리 등)에서 정수 과정에 어려움을 주고 있으며, 건강상 장애를 유발하여, 사회·경제적으로 심각한 문제로 대두되고 있다(Ha 등, 1999).

이와 같이 낙동강 유역의 부영양화에 대한 여러 가지 연구가 진행되었다. 본 연구의 목적은 WASP모형을 이용하여 낙동강 유역의 하류 지역인 물금의 부영양화를 모의하고 예측하는 것이다. 부영양화 모의에는 관측된 동물성 플랑크톤 개체수를 입력하며, 동물성 플랑크톤 개체수를 이용한 모의결과와 과거의 수질 측정결과를 비교한다. 그리고 신경망모형을 이용하여 미래의 동물성 플랑크톤 개체수를 예측한 후 WASP모형을 이용하여 단기 수질을 예측한다. 수질 예측에 사용된 입력 자료는 수온을 대신하여 기온을 사용한다. 수온은 예측을 하기가 어려운 반면, 기온의 경우 기상청에서 단기 예보를 하기 때문에 기온을 사용하여 모의를 하는 것이 단기 수질 예측에 유의한 의미가 있을 것으로 판단된다.

1.2 연구동향

1.2.1 WASP모형

WASP모형은 최초로 Di Toro 등(1983)에 의해서 개발되어 다양한 적용을 통해서 수정·보완되어 미국 환경청에 의해 발표되었다. 시간에 따른 입력치의 변화를 고려할 수 있어서, 연중변화는 물론 짧은 시간간격 사이의 수질성분변화를 분석하는 곳에 많이 사용된다.

Lung과 Larson(1995)은 WASP5를 Mississippi 강에 적용하여 여름철 유량이 적을 때 Chl-a의 농도가 50~60 $\mu\text{g/L}$ 로 가장 최적의 수질을 나타낸다는 결론을 얻었다. Jin 등(1998)은 Okeechobee 호소에 WASP모형을 이용하여 호소관리 면에서 가장 최적인 방법을 찾는데 이용하였다. Hernandez 등(1997)은 microcosms의 예측을 통한 플랑크톤과 영양물질의 거동을 해석하였다. Wang 등(1999)은 Tampa Bay의 외부에서 작용하는 영양물질과 수질사이의 관계를 모의하고 해석하였다.

조흥연 등(1993)은 팔당호에 WASP모형을 적용하여 모형의 매개변수를 추정하고, 수질예측을 실시하였다. 신동석 등(1993)은 도시유역을 지나 는 안양천에 대해 매개변수를 추정하고, 수질예측을 통한 수질관리에 이용하였다. 성기준(1993)은 한강 본류구간에 대해서 WASP모형과 QUAL2E 모형 및 AUTO-QUAL 모형을 적용하여 결과를 비교하여, WASP모형이 질산성질소를 제외한 수질항목에서 높은 정확도를 나타내는 것으로 나타났다. 황병기(1997)는 수질 모델 EUTRO5를 이용한 확산 계수 산정법에 관한 연구에서 메릴랜드 연안만의 영양 염류와 조류의 증식에 의한 부영양화 현상을 예측하기 위한 전 단계로 여름에 만의 질량 운동과 확산율을 정량화 하기위해 이차원 수리 모형을 사용하였다. 김연국 등(2000)은 Chl-a의 경우 유전자 알고리즘에 의해 추정된 매개변수를 모형에 적용하여 수질을 모의한 결과가 경험적 시행착오법으로 추정된

매개변수를 모형에 적용하여 모의한 결과보다 관측값에 비슷하게 나타남을 제시하였다. 한건연과 백창현(2004)은 WASP5 모형을 대청호의 관측값과 비교하여 모형의 보정과 검증을 수행하였고, 수질관리시스템 구축을 위한 GIS와의 연계는 ArcView의 Avenue를 이용하여 구성하였다. Avenue를 통한 다양한 메뉴 구성 및 이를 통한 모의수행은 사용자 요구나 편의에 맞게 손쉽게 처리할 수 있도록 구성하였다. 따라서, GIS 환경에서 실제적이고 효율적인 수질관리 뿐만 아니라 장래수질의 예측도 가능하기 때문에 대청호 이외에 다른 유역에 대한 활용성도 매우 높을 것으로 판단하였다. 서동일과 이정우(2005)는 평택호의 준설시나리오에 대하여 EFDC-Hydro와 WASP 7.0 모형을 사용하여 수질모의를 수행하였다. EFDC-Hydro를 사용함으로써 기존에 제기되었던 WASP모형의 수리계산을 보완할 수 있었으며 복잡한 수체에 대해서도 WASP모형의 격자구성을 용이하게 할 수 있었다.

1.2.2 신경망모형

Liong 등(1993)은 개념적 모형으로부터 생성된 자료에 대한 유출모의를 하였다. Karunanithi와 Grenney(1994)는 하천유출예측에 있어서 신경망을 적용하여 분석하였다. Smith와 Eli(1995)는 지류를 포함한 복합하천 유역에 신경망모형을 적용하여 유출과정을 검토하였다. Nouh(1996)가 도시하수의 수질을 모형화 하기위해 사용한 SWMM 모형의 최적 매개변수 산정에 신경망 이론을 적용하였고 Yabunaka 등(1997)은 호수의 부영양화 예측에 역전과 알고리즘을 적용하고 실측치와 비교하였다. Luk 등(2000)은 강우예측을 위한 신경망을 적용하였다.

김주환(1993)은 학습에 의하여 연결강도를 조절함으로써 유출예측모형을 구성하였다. 오남선과 선우중호(1996)는 신경망이론을 강우예측모형에 적용하여 서울 및 소양강 유역의 강우자료를 이용하여 결과를 분석하였

다. 이순탁과 김성원(1997)은 역전과 학습알고리즘 기법에 의하여 신경망 모형의 홍수유출특성을 분석하였다. 신현석 등(1998)은 도시구역의 유출 및 비점오염원 예측에 신경망모형을 적용하고 SWMM과 비교하여 신경망모형의 적용성을 확인하였고, 김만식 등(1999, 2001)은 신경망 이론을 이용하여 섬진강 상류와 남한강 수계의 하천을 대상으로 수질예측을 하였다. 정건희(2001)는 대청댐의 수질예측에 신경망모형을 적용하여 월 수질 및 일 수질 예측모형의 적용성을 검토하였다. 정지현(2003)은 신경망의 역전과 학습알고리즘을 이용하여 댐 유입량을 예측하였다.



1.3 연구의 내용 및 범위

낙동강의 하류 지역인 물금의 경우 연 중 대부분 Chl-a 농도가 미국 EPA의 부영양화 기준인 $10 \mu\text{g/L}$ 를 넘어서고 있다(그림 1.1).

본 연구는 물금의 Chl-a를 중심으로 수질을 모의하기 위해, 수질모의에는 WASP모형을 사용하였으며, 동물성 플랑크톤 예측에는 신경망모형인 MLP(Multi-Layer Perceptron) 모형을 사용하였다. 연구의 내용 및 범위는 다음과 같다.

먼저, 2장에서 WASP모형과 신경망모형의 이론을 소개하고, 3장은 동물성 플랑크톤 개체수와 식물성 플랑크톤의 사멸률을 이용한 WASP 모의 결과를 비교한 후 매개변수에 대해서 민감도 분석을 하였다. 4장은 신경망모형을 이용하여 수질 예측에 사용될 동물성 플랑크톤을 예측하여 관측값과 비교하였다. 5장에서는 4장에서 예측한 동물성 플랑크톤 개체수와 기온을 사용한 수질의 단기 예측의 방법을 설명하고 예측 결과를 분석하였다. 마지막으로 6장에서는 결론 및 향후과제를 제시하였다.

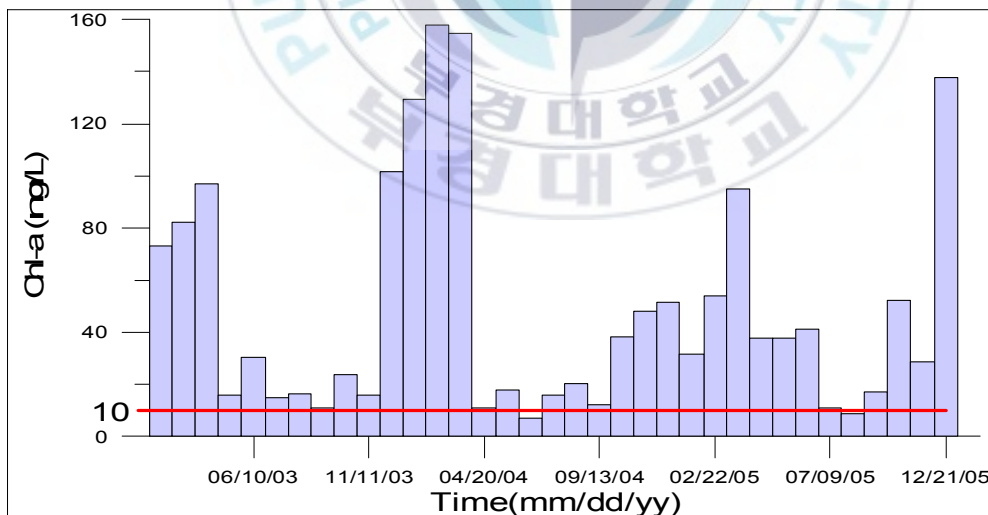


그림 1.1 물금의 Chl-a의 농도

2. 수질모형과 신경망모형

2.1 수질모형의 선정

하천 수질모형은 하천 수체 내에서 발생하는 수질 변화 양상을 정량적으로 표현하기 위하여 제안된 것으로 하천 수질 관리를 위한 주요한 도구로 사용되어 왔다. 1925년 Streeter와 Phelps가 하천의 생화학적 산소요구량과 용존산소의 변화양상을 최초로 제시하였던 것을 기본으로 호수, 해양, 지하수 등 여러 대상에 대한 모델들이 개발·제시되었으며, 1980년대 컴퓨터 및 전산기법의 개발은 하천 수질모형을 통해 구현하고자 하는 대상의 적절한 정밀도와 요약화, 단순화가 가능한 수준에 이르게 되었다(한국수자원공사, 2001).

모형을 선정하기 위하여 하천에 적용 가능한 1차원 수질모형인 QUAL2E와 하천 및 호소에 적용 가능한 WASP모형을 비교하였다(표 2.1, 2.2). QUAL2E모형의 단점은 수초나 부착조류에 의한 용존산소 변화와 부유 조류 사멸 시 발생하는 유기물의 영향이 고려되지 않으며, 용존산소가 부족한 상태에서 반응이 활발한 탈질화 과정(detrification)이 포함되지 않아 수질변화에 이들 영향이 크게 작용하는 하천에 적용하기에 한계가 있다고 알려져 있다. 이를 감안하여 본 연구에 수행할 수질모형은 용존산소/부영양화 해석부분인 Eutrophication 부 모형이 포함되어 있는 WASP 7.2 모형으로 선정하였다.

표 2.1 지표수 수질모형에 대한 기본 정보 (Ambrose 등, 1996)

		QUAL2E	WASP
대상수체	하천	○	○
	저수지/호소	×	○
	하구부	○	○
차원	1차원	○	○
	2차원(x/y)	×	○
	2차원(x/z)	×	○
	3차원(box 형태)	×	○
시간	정상상태	○	○
	유사 동적상태	○	○
	동적상태	×	○
동수역학	입력여부	○	○
	모의여부	×	○
	수공구조물의 역할	×	×
이송 확산	유체이동	○	○
	확산	○	○
	하상교환	×	○
오염 부하	입력(정상상태)	○	○
	입력(비정상상태)	×	○
	모의여부	×	○
기타	전처리 과정	○	○
	후처리 과정	○	○

표 2.2 지표수 수질모형에서 변수와 수질반응 과정 (Ambrose 등, 1996)

		QUAL2E	WASP
화학적 반응	1차 감쇄	○	○
	반응동역학	×	○
	화학적 부산물	×	○
	흡착	×	○
토사이동	변동률 입력과정	×	○
	비점착성 이동과정	×	×
	점착성 이동과정	×	×
수질과정	수온	○	○
	염도	○	○
	박테리아	×	×
	DO-BOD	○	○
	DO-Carbon 균형	×	×
	질소 순환	○	○
	인 순환	○	○
	규소 순환	×	×
	식물성 플랑크톤	○	○
	동물성 플랑크톤	×	×
	하상 조류	×	×
	하상 산소요구량	×	○

2.2 WASP(Water Quality Analysis Simulation Program)

모형의 이론

WASP모형은 지표수 내의 수질과 오염물의 반응, 유동을 모의하는 일
반화된 다중의 모형구조를 갖는다. 이 모형은 동적이고 1, 2, 3차원 적용
이 모두 가능하므로 하천과 호소의 경우에 모두 사용할 수 있다. 독성물
해석부분인 Toxicant는 유기화학 반응에 관한 동역학을 퇴적층과 그 상
부의 물기둥 내에 용해되거나 흡착된 화합물의 농도를 예측하는 간단한
퇴적형 알고리즘과 결합시킨다. 용존산소/부영양화 해석부분인
Eutrophication 부 모형은 용존산소, 탄소성 생화학적 산소요구량, 영양물
질과 유기물질에 의해 영향을 받는 식물성 플랑크톤 동역학을 예측한다.
오염물 운송은 제시된 흐름조건이나 다른 동수역학 모형의 결과를 이용
하여 처리할 수 있다. 그림 2.1은 WASP모형 중 Eutrophication 부 모형
의 구성물질간 상호 작용을 나타낸 그림이다. Eutrophication 부 모형은
6가지 종류의 난이도에 따라 수질을 모의할 수 있다(표 2.3).

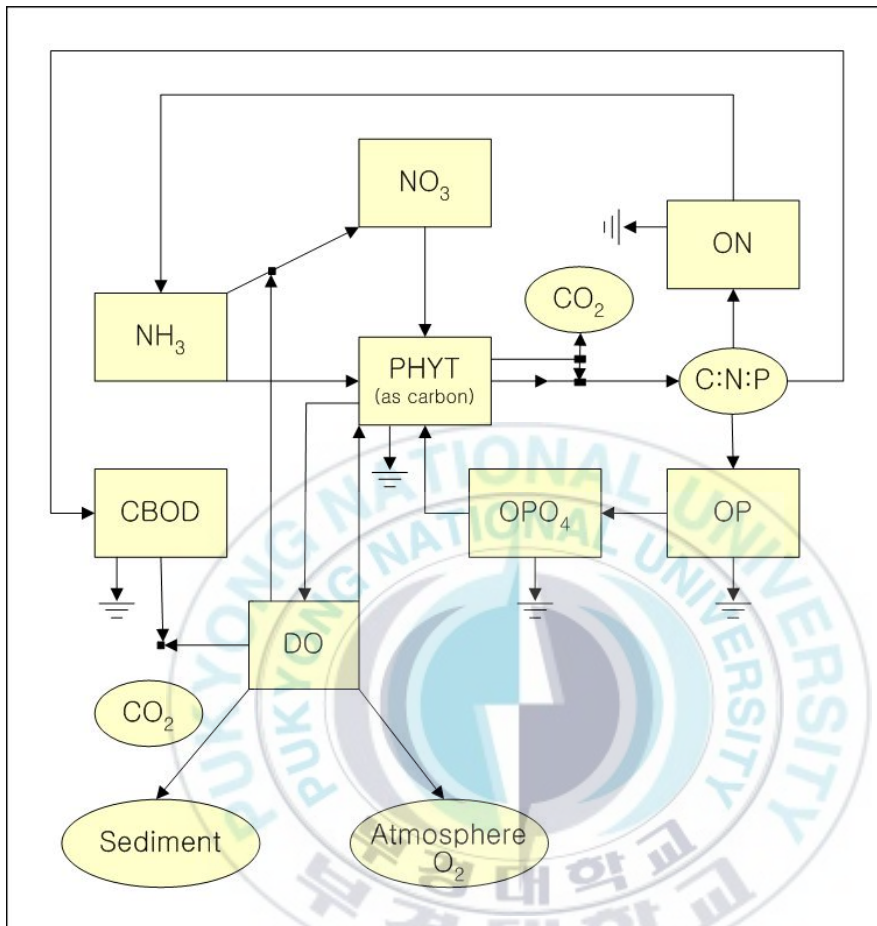


그림 2.1 Eutrophication 부 모형에서 구성물질간의 상호작용
(Ambrose 등, 2004)

표 2.3 Eutrophication 부 모형의 복잡도와 수질항목 (한국수자원학회, 1999)

System number	Symbol	Name	Use in complexity level					
			1	2	3	4	5	6
1	NH ₄	Ammonia nitrogen		○	○	○	○	○
2	NO ₃	Nitrate nitrogen			○	○	○	○
3	PO ₄	Inorganic phosphorus				○	○	○
4	CHL	Phytoplankton carbon				○	○	○
5	CBOD	Carbonaceous BOD	○	○	○	○	○	○
6	DO	Dissolved oxygen	○	○	○	○	○	○
7	ON	Organic nitrogen			○	○	○	○
8	OP	Organic phosphorus				○	○	○
Complexity level			Explanation					
1			"Streeter-Phelps" BOD-DO with SOD					
2			"Modified Streeter-Phelps" with NBOD					
3			Linear DO balance with nitrification					
4			Simple eutrophication					
5			Intermediate eutrophication					
6			Intermediate eutrophication with benthos					

2.2.1 기본 방정식

동수역학 모형은 운동방정식과 연속방정식으로 구성되는 천수방정식을 link-node 기법에 의해서 해석한다.

(1) 운동방정식

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial U}{\partial x} + \alpha_g + \alpha_f + \alpha_w \quad (2.1)$$

여기서, U 는 수로축에 따른 유속(m/s), x 는 수로축에 따른 거리(m), t 는 시간(sec), α_g 는 중력가속도(m/sec²), α_f 는 마찰가속도(m/sec²), α_w 는 바람에 의한 응력가속도(m/sec²)이다.

(2) 연속방정식

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\frac{\partial Q}{\partial x} = -U \frac{\partial A}{\partial x} - A \frac{\partial U}{\partial x} \quad (2.2)$$

여기서, A 는 단면적(m^2), Q 는 유량(m^3/sec)이다.

2.2.2 질량보존 방정식

수체내의 용존물질에 대한 질량보존 방정식(mass balance equation)은 확산에 의한 효과, 이송에 의한 효과, 생·화학적 변환, 외부로부터의 부하등을 고려해야 한다. 3차원의 경우에 대한 질량보존 방정식은 식 (2.3)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(U_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(U_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(U_z C) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) \\ & + S_L + S_B + S_K \end{aligned} \quad (2.3)$$

여기서, C 는 오염물질의 농도(mg/L 또는 g/m^3), t 는 시간(d), U_x, U_y, U_z 는 종방향, 횡방향, 연직방향 유속(m/d), E_x, E_y, E_z 는 종방향, 횡방향, 연직방향 확산계수(m^2/d), S_L 는 오염물 부하율($g/m^3/d$), S_B 는 표층수, 저층수 및 하상과 대기를 포함한 경계 부하율($g/m^3/d$), S_K 는 총 동역학적 변형률로서 양이면 생성항, 음이면 소멸항($g/m^3/d$)이다.

미소체적을 더 큰 인접한 구간으로 확장하고 적절한 이송, 부하, 변환 매개변수를 지정함으로써 WASP모형은 유한차분형태로 구성될 수 있다.

연직방향과 횡방향에 균일하다고 가정하면 y 와 z 에 대하여 적분하면 식 (2.3)은 식 (2.4)와 같은 1차원 질량보존식이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(AC) = \frac{\partial}{\partial t} \left(-U_x AC + E_x A \frac{\partial C}{\partial x} \right) + A(S_L + S_B) + AS_K \quad (2.4)$$

여기서, A 는 단면적(m^2)이다. 위 식의 우변은 세 가지 수질 과정인 이송·확산과정(우변의 t 미분 항), 부하과정, 변환과정(우변의 마지막 항)을 나타낸다.

2.2.3 예측수질항목의 반응 및 상호 관계식

(1) 식물성 플랑크톤(phytoplankton)

식물성 플랑크톤의 농도는 식물성 플랑크톤의 성장에 의해 증가하고, 소멸과 침전에 의해 감소한다.

$$\frac{\partial C_4}{\partial t} = \left(G_{P1} - D_{P1} - \frac{V_{S4}}{D} \right) C_4 \quad (2.5)$$

여기서, C_4 는 탄소로 표시된 식물성 플랑크톤의 농도($mg\ C/L$), G_{P1} 은 식물성 플랑크톤 성장률(day^{-1}), D_{P1} 은 식물성 플랑크톤 소멸률(day^{-1}), V_{S4} 는 식물성 플랑크톤 침강속도(m/day), D 는 수체의 깊이(m)이다.

(2) 식물성 플랑크톤 인(phytoplankton phosphorus)

식 (2.5)에서 탄소로 표시된 식물성 플랑크톤의 인 변화율(phosphorus to carbon ratio) a_{PC} ($mg\ P/mg\ C$)를 고려한 것이 식물성 플랑크톤 인의 농도($mg\ C/L$)가 된다.

$$\frac{\partial(C_4 a_{PC})}{\partial t} = \left(G_{P1} - D_{P1} - \frac{V_{S4}}{D} \right) C_4 a_{PC} \quad (2.6)$$

(3) 식물성 플랑크톤 질소(phytoplankton nitrogen)

식물성 플랑크톤의 인의 농도와 마찬가지로 식 (2.5)에서 탄소로 표시된 식물성 플랑크톤의 질소 변화율(nitrogen to carbon ratio) a_{NC} (mg N/mg C)를 고려한 것이 식물성 플랑크톤 질소의 농도(mg C/L)가 된다.

$$\frac{\partial(C_4 a_{NC})}{\partial t} = \left(G_{P1} - D_{P1} - \frac{V_{S4}}{D} \right) C_4 a_{NC} \quad (2.7)$$

(4) 유기인(organic phosphorus)

유기인의 농도는 식물성 플랑크톤의 소멸에 의해 증가하고, 유기인의 가수분해와 침전에 의해 감소한다.

$$\frac{\partial C_8}{\partial t} = D_{P1} C_4 a_{PC} f_{OP} - k_{83} \theta_{83}^{(T-20)} \frac{C_4}{K_{mPC} + C_4} C_8 - \frac{V_{S3}(1-f_{D8})}{D} C_8 \quad (2.8)$$

여기서, C_8 은 유기인의 농도(mg P/L), f_{OP} 는 Chl-a의 사체가 유기인으로 변하는 비율, k_{83} 은 20 °C에서 용해 유기인의 가수분해율(day^{-1}), θ_{83} 은 온도보정계수, V_{S3} 은 유기물의 침강속도(m/day), f_{D8} 은 용해유기인의 비율, K_{mPC} 는 인 순환과정에서 최대 식물성 플랑크톤농도에 관한 반포화상수(half saturation constant for phytoplankton limitation of phosphorus recycle, mg C/L)이다.

(5) 인산 인($\text{PO}_4\text{-P}$, orthophosphate phosphorus)

인산 인의 농도는 유기인의 가수분해에 의해 증가하고, 식물성 플랑크톤의 성장과 인산 인의 침전에 의해 감소한다.

$$\frac{\partial C_3}{\partial t} = D_{P1}a_{PC}(1 - f_{D3})C_4 + k_{83}\theta_{83}^{(T-20)} \frac{C_4}{K_{mPC} + C_4} C_8 - G_{P1}C_4a_{PC} \quad (2.9)$$

여기서, C_3 은 인산인의 농도(mg P/L), f_{D3} 은 수체내의 인산 인의 비율이다.

(6) 유기질소(organic nitrogen)

유기질소의 농도는 식물성 플랑크톤의 사멸에 의해 증가하며, 유기질소의 가수분해와 침전에 의해 감소한다.

$$\frac{\partial C_7}{\partial t} = D_{P1}a_{NC}f_{ON}C_4 - k_{71}\theta_{71}^{(T-20)} \left(\frac{C_4}{K_{mPC} + C_4} \right) C_1 - \frac{V_{S3}(1 - f_{D7})}{D} C_1 \quad (2.10)$$

여기서, C_7 은 유기질소의 농도(mg N/L), θ_{71} 은 온도보정계수, f_{ON} 은 유기질소 변환과정에서 식물성 플랑크톤 사멸-호흡 비율, k_{71} 은 20 °C에서 유기질소의 가수분해율(day^{-1}), f_{D7} 은 수체내 용존 유기질소의 비율이다.

(7) 암모니아성 질소(NH₃-N)

암모니아성 질소는 유기질소의 가수분해와 식물성 플랑크톤의 소멸에 의해 증가하고, 식물성 플랑크톤의 성장과 암모니아성 질소의 질산화과정을 통해 감소한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_1}{\partial t} = & D_{P1}a_{NC}(1-f_{ON})C_4 + k_{71}\theta_{71}^{(T-20)}\left(\frac{C_4}{K_{mPC}+C_4}\right)C_7 \\ & - G_{P1}a_{NC}P_{NH3}C_4 + k_{12}\theta_{12}^{(T-20)}\left(\frac{C_6}{K_{NIT}+C_6}\right)C_1 \end{aligned} \quad (2.11)$$

여기서, C_1 은 암모니아성 질소(mg N/L), P_{NH3} 은 식물성 플랑크톤의 암모니아성 질소 흡입선호도, k_{12} 는 20 ℃에서 질산화율(day⁻¹), θ_{12} 는 온도 보정계수, C_6 은 용존산소의 농도(mg O₂/L), K_{NIT} 는 질산화 과정의 최대 산소농도에 관한 반포화상수(mg O₂/L)이다.

한편, P_{NH3} 의 산정은 식 (2.12)와 같다.

$$P_{NH3} = C_1\left(\frac{C_2}{(K_{mN}+C_1)(K_{mN}+C_2)}\right) + C_1\left(\frac{K_{mN}}{(C_1+C_2)(K_{mN}+C_2)}\right) \quad (2.12)$$

여기서, C_2 는 NO₃-N의 농도(mg N/L), K_{mN} 은 최대 질소농도에 대한 반포화상수(mg N/L)이다.

(8) 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)

$\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도는 암모니아성 질소의 질산화에 의해 증가하고, 식물성 플랑크톤의 성장과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 탈질산화에 의해 감소한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_2}{\partial t} = & k_{12}\theta_{12}^{(T-20)} \left(\frac{C_6}{K_{NIT} + C_6} \right) C_1 - G_{PI}a_{NC}(1 - P_{NH3})C_4 \\ & - k_{2D}\theta_{12}^{(T-20)} \left(\frac{K_{NO3}}{K_{NO3} + C_6} \right) C_2 \end{aligned} \quad (2.13)$$

여기서, k_{2D} 는 20 ℃에서 탈질산화율(day^{-1}), K_{NO3} 는 탈질산화과정의 최대산소농도에 관한 반포화상수($\text{mg O}_2/\text{L}$)이다.

(9) 탄소성 BOD(carbonaceous BOD)

CBOD의 농도는 식물성 플랑크톤의 소멸에 의해 증가하고, CBOD의 산화 및 침전과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 탈질화 과정을 통해 감소한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_5}{\partial t} = & a_{OC}k_{1D}C_4 - k_D\theta_D^{(T-20)} \left(\frac{C_6}{K_{BOD} + C_6} \right) C_5 - \frac{V_{S3}(1 - f_{D5})}{D} C_5 \\ & - \frac{5}{4} \frac{32}{14} k_{2D}\theta_{2D}^{(T-20)} \left(\frac{K_{NO3}}{K_{NO3} + C_6} \right) C_2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

여기서, C_5 는 CBOD농도($\text{mg O}_2/\text{L}$), k_{1D} 는 식물성 플랑크톤의 분해율(day^{-1}), a_{OC} 는 탄소의 산소 변화율($\text{mg O}_2/\text{mg C}$), k_D 는 20 ℃에서 탈산소율(day^{-1}), θ_D 는 온도보정계수, K_{BOD} 는 최대 산소농도에 관한 반포화상수($\text{mg O}_2/\text{L}$), f_{D5} 는 수체내의 용해 CBOD의 비율이다.

(10) 용존산소(dissolved oxygen)

용존산소의 농도는 채포기 과정과 조류에 의해 증가하고, 탈산소 과정, 질산화 과정, 그리고 하상퇴적물에 의해 감소한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_6}{\partial t} = & k_2(C_S - C_6) - k_d \theta_d^{(T-20)} \left(\frac{C_6}{K_{BOD} + C_6} \right) C_5 \\ & - \frac{64}{14} k_{12} \theta_{12}^{(T-20)} \left(\frac{C_6}{K_{NIT} + C_6} \right) C_1 - \frac{SOD}{D} \theta_s^{(T-20)} \\ & + G_{Pl} \left(\frac{32}{12} + \frac{48}{14} \frac{14}{12} (1 - P_{NH3}) \right) C_4 - \frac{32}{12} k_{1R} \theta_{1R}^{(T-20)} C_4 \end{aligned} \quad (2.15)$$

여기서, C_6 은 용존산소 농도(mg O₂/L), k_d 는 20 ℃에서 채포기계수 (day⁻¹), θ_d 는 온도보정계수, C_s 는 포화 용존산소 농도(mg O₂/L), SOD 는 하상퇴적물 산소 요구량(mg/m²/day)이다.

2.3 신경망(Artificial Neural Network) 모형의 이론

2.3.1 신경망의 배경

신경망모형의 연구는 McCulloch과 Pitts(1943)에 의해서 시작되었다. 이들은 인간의 두뇌를 수많은 신경세포들로 이루어진 컴퓨터라고 정의하였다. 단순한 논리적 업무를 수행하는 모형을 보여줬고, 또한 패턴분류 문제가 인간의 지능적인 행위를 규명하는 이론에 매우 중요하다는 것을 인식하였다(McCulloch과 Pitts, 1947).

Hebb의 학습 규칙은 두 뉴런 사이의 연결강도(weight)를 조절할 수 있는 최초의 규칙이었다(Hebb, 1949). 이 규칙은 학습에 관한 연구를 발전시켰으며 적응적인 신경망 연구에 많은 영향을 주었다.

Rosenblatt은 퍼셉트론(perceptron)이란 최초의 신경망 모델을 발표하였으며, 학습 프로세스에 알파강화 규칙을 사용하였다. 퍼셉트론에 대한 관심의 주된 이유는 어떤 종류의 패턴이 입력층에 주어졌을 때 이 모델이 반응하게 하는 연결강도의 집합을 스스로 발견하는 자동적인 절차에 있다. 학습은 현재 주어진 입력 행렬에 대하여 현재의 각 연결강도를 조정함으로써 얻어질 수 있다.

Minsky와 Papert는 Perceptrons(Minsky와 Papert, 1969)에서 퍼셉트론 모형을 수학적으로 분석하여 모형의 단점을 밝혀냈고, 이후 신경망의 연구는 침체의 길을 걷게 되었다. 그러나 1970년대 말과 1980년대 초반에 들어 Kohonen, Hopfield, Kirkpatrick, Hinton, Grossberg, Rumelhart 등이 신경망을 다시 활성화시켰다.

퍼셉트론과 같이 하나의 조정층(single-adjustable layer)으로 구성된 모형들의 한계점들 때문에 입력층, 출력층, 그리고 한 개 또는 그 이상의 은닉층(hidden layer)을 쓰는 새로운 모형들이 1980년대 중반에 제안되었으며, 특히 PDP(Parallel Distributed Processing) 그룹에 의한 폭 넓은

연구가 있었다(Rumelhart 등, 1986). 이 그룹에서 제안한 모형은 은닉층과 역전파(back-propagation) 학습 알고리즘을 사용함으로써 선형 분리 문제뿐만 아니라 여러 가지 문제점들을 해결할 수 있는 계기를 마련하였다.

2.3.2 신경망의 분류

신경망은 고정된 패턴을 분류하는 방법에 따라 그림 2.2와 같이 분류될 수 있다(김대수, 2005).

이러한 분류 방법은 입력의 형태에 따라 이진수(binary)와 연속값(continuous value)으로 나누어지며, 훈련방법에 따라 지도학습(supervised learning) 모형과 자율학습(unsupervised learning) 모형으로 나누어진다.

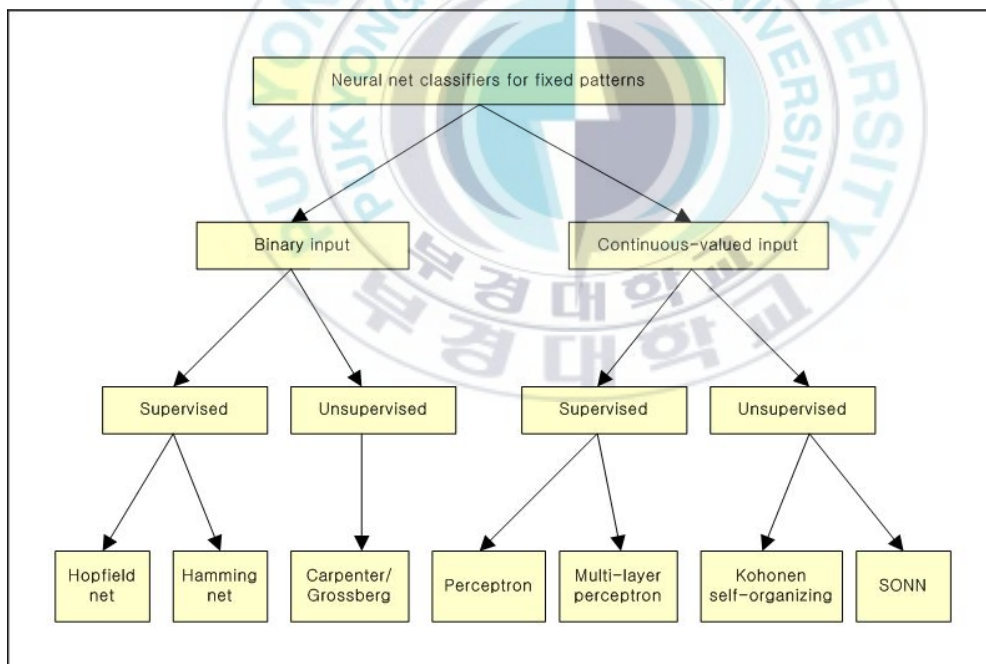


그림 2.2 고정된 패턴을 위한 신경망의 분류

2.3.3 다층 퍼셉트론(multi-layer perceptron)과 역전파 알고리즘 (back-propagation algorithm)

인공신경망의 하나인 다층 퍼셉트론(multi-layer perceptron)과 계산을 수행하는 역전파 알고리즘(back-propagation algorithm)은 지도학습으로서 학습을 위한 입력 자료(input data)와 결과물인 출력 자료(output data)로 구성되어져 있다(그림 2.3).

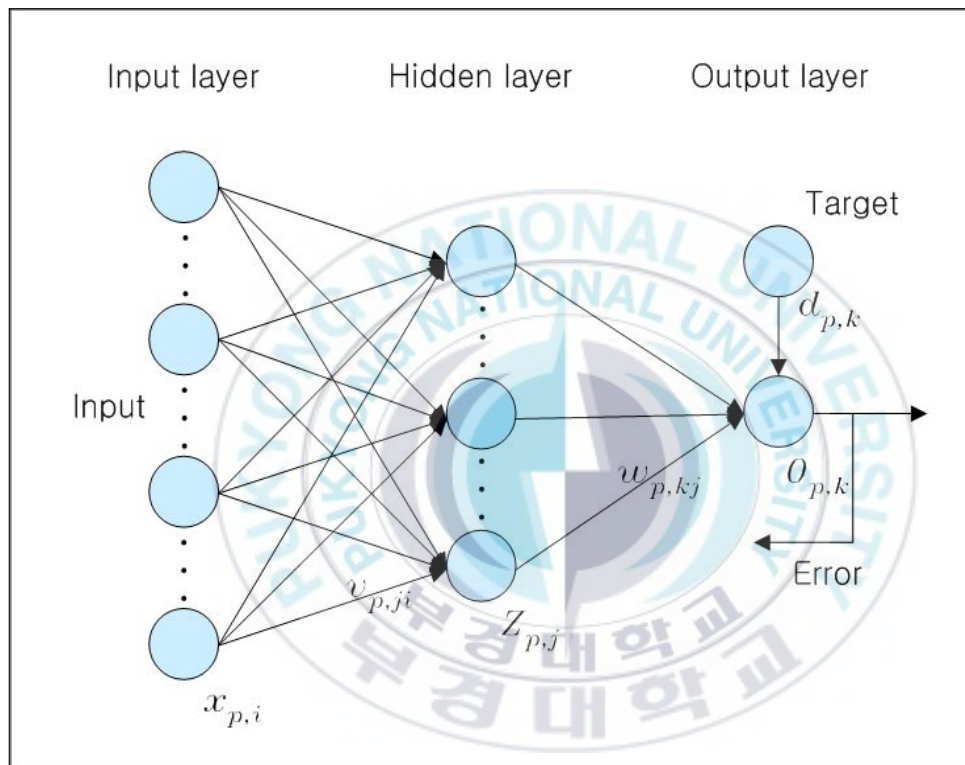


그림 2.3 다층 퍼셉트론의 구조

다층 퍼셉트론은 입력층과 출력층 사이에 하나 이상의 중간층이 존재하는 구조를 갖는다. 입력층과 출력층 사이의 중간층을 은닉층이라고 한다.

학습은 실제 출력 데이터와 원하는 출력 데이터간의 평균제곱차(mean

square error)를 줄여가는 방향으로 이루어진다. 즉 입력층의 각 노드에 입력 패턴을 주면, 이 신호는 각 노드에서 조절되어 중간층에 전달되고 출력층에서 신호를 출력하게 된다. 이 출력값과 기대값을 비교하여 차이를 줄여가는 방향으로 연결강도를 조절하고 상위층에서 하위층으로 연결 강도를 조정해 나간다.

패턴 $p(NE_{p,j})$ 에 대한 은닉층의 뉴런 j 의 입력은 각 입력층의 출력 ($x_{p,i}$: 모수의 입력 값)과 가중치(v_{ji})의 곱들의 합에 의해 계산된다. 은닉층의 뉴런 j 의 출력($Z_{p,j}$)과 출력층의 뉴런 k 의 출력($O_{p,k}$)을 계산하기 위한 활성화 함수는 로지스틱(logistic) 함수를 사용한다.

$$f(NE) = \frac{1}{1 + \exp(-\lambda \cdot NE)} \quad (2.16)$$

단, λ 는 활성화 함수 계수를 나타내며, NE 는 은닉층 또는 출력층의 뉴런의 출력의 계산을 위한 활성화 함수를 나타낸다.

패턴 p 에 대해 v_{ji} 는 입력층 뉴런 i 와 은닉층 뉴런 j 사이의 연결 가중치를 나타내며, w_{kj} 는 은닉층 뉴런 j 와 출력층 뉴런 k 사이의 연결 가중치로 정의된다. 이들과 출력 $Z_{p,j}$, $O_{p,k}$ 의 관계식은 다음과 같다.

$$Z_{p,j} = f\left(\sum_i x_{p,i} v_{ji}\right) \quad (2.17)$$

$$O_{p,k} = f\left(\sum_j z_{p,j} w_{kj}\right) \quad (2.18)$$

역전파 알고리즘은 오류를 최소화하기 위한 방법으로 네트워크의 연결 가중치들(v_{ji} , w_{kj})을 변경한다. 패턴 p 에 대한 각 뉴런의 오류 합(Err)은 다음과 같이 계산된다.

$$Err = \frac{1}{2} \sum_k (d_{p,k} - O_{p,k})^2 \quad (2.19)$$

여기서, $d_{p,k}$ 는 뉴런 k 에서 패턴 p 에 대응하는 목표 값에 해당한다.



3. WASP모형을 이용한 수질모의

3.1 수질모의 조사지점 및 입력자료 구축

3.1.1 수질모의 조사지점

WASP모형에 사용될 수질 조사지점은 그림 3.1과 같이 낙동강 본류 7개 지점, 지류는 금호강, 회천, 황강, 밀양강을 포함하고 있다.

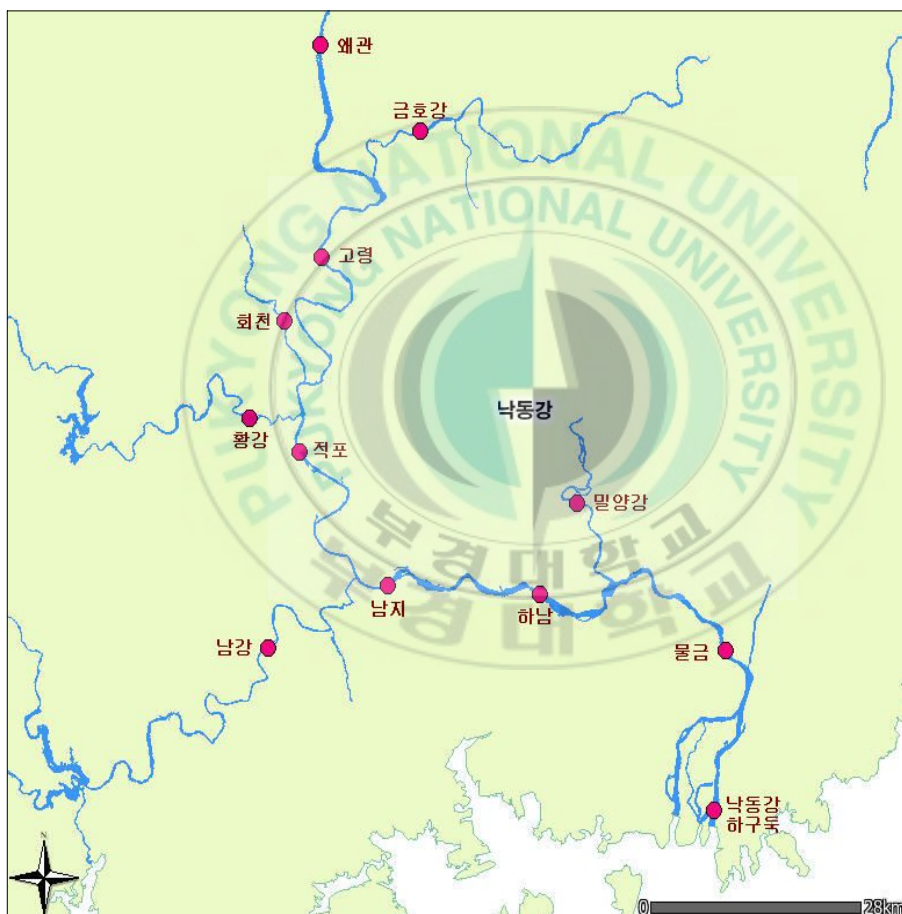


그림 3.1 수질모의 조사지점

3.1.2 입력자료 구축

(1) 구간의 분할

전체 수질모의 대상구간은 낙동강본류(왜관~낙동강 하구둑)와 지류인 금호강, 회천, 황강, 남강, 밀양강을 포함한 총 72 개의 구간(segment)으로 구성하였으며 구간의 평균길이는 약 3.8 km이다(그림 3.2).

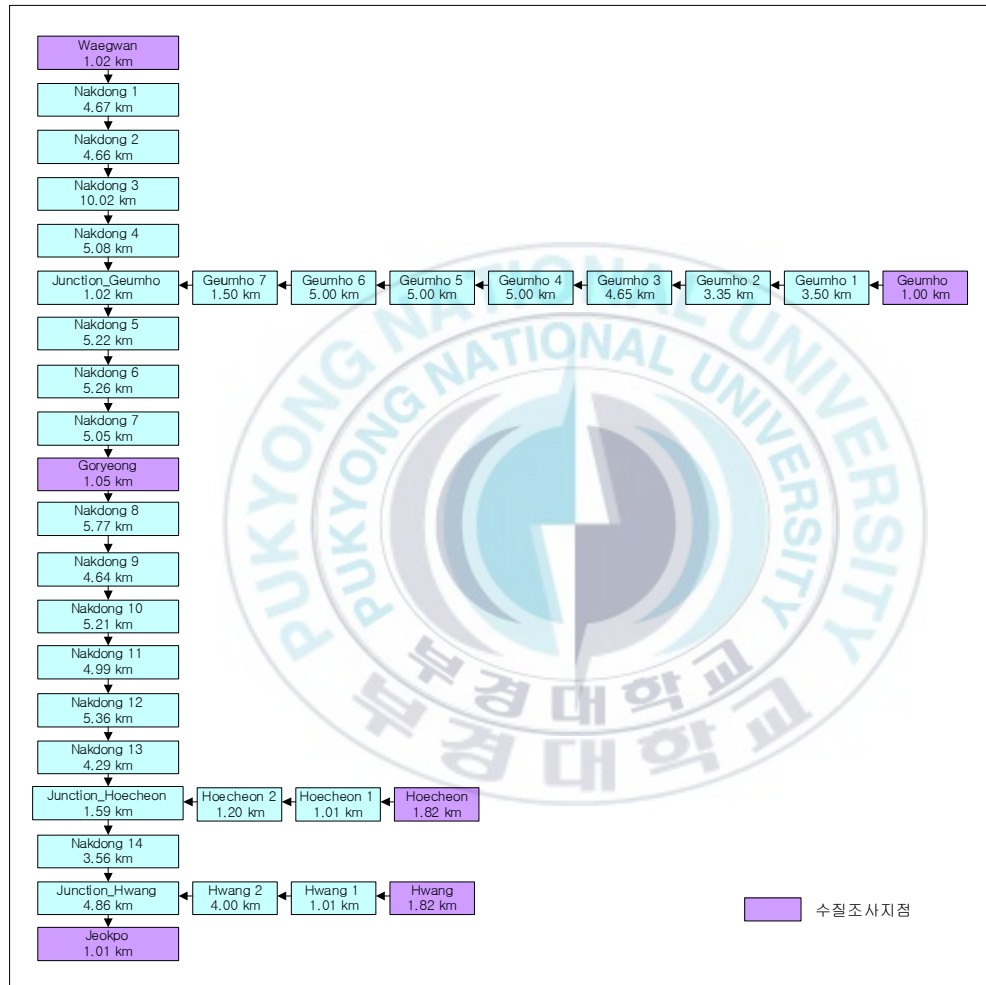


그림 3.2 모의 구간의 모식도

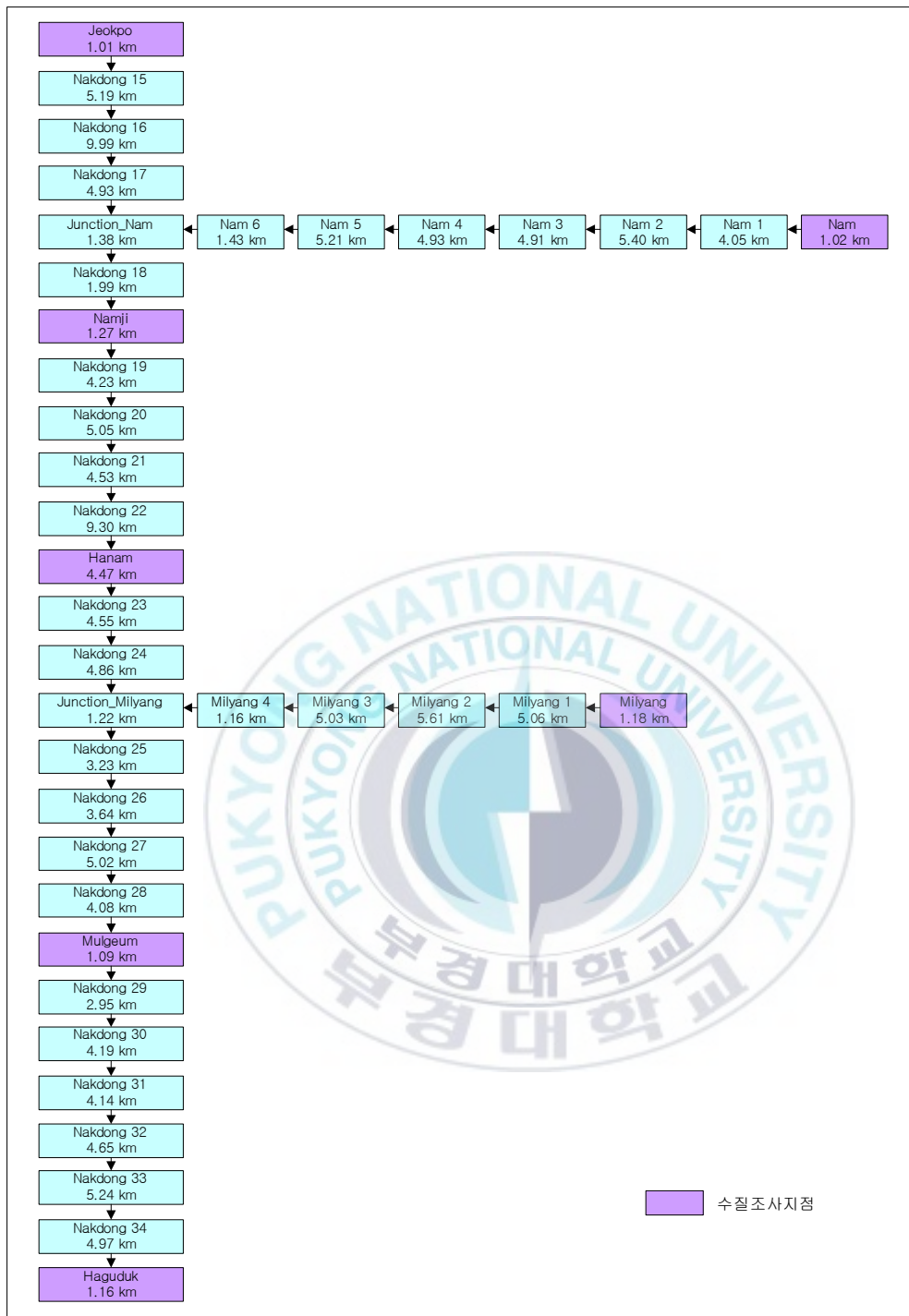


그림 3.2 모의 구간의 모식도 (계속)

(2) 유량자료

WASP 모의에 사용되는 수위-유량 관계는 낙동강 조사월보(부산광역시, 2003~2005)의 관측 유량과 한국수문조사연보(건설교통부, 2003~2005)의 수위자료를 사용하여 나타내었다(그림 3.3). 추정된 수위-유량 관계 곡선식은 표 3.1과 같다.

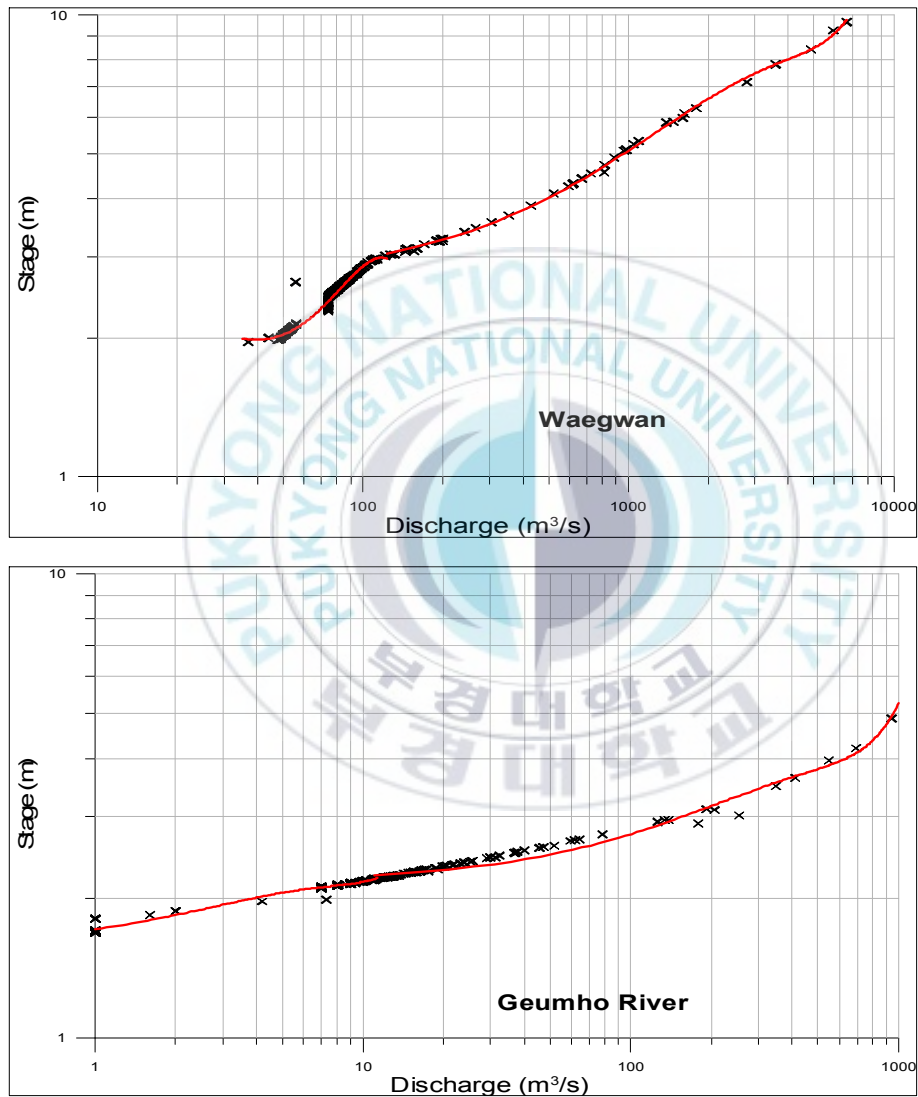


그림 3.3 낙동강 본류 및 지류의 수위-유량 곡선

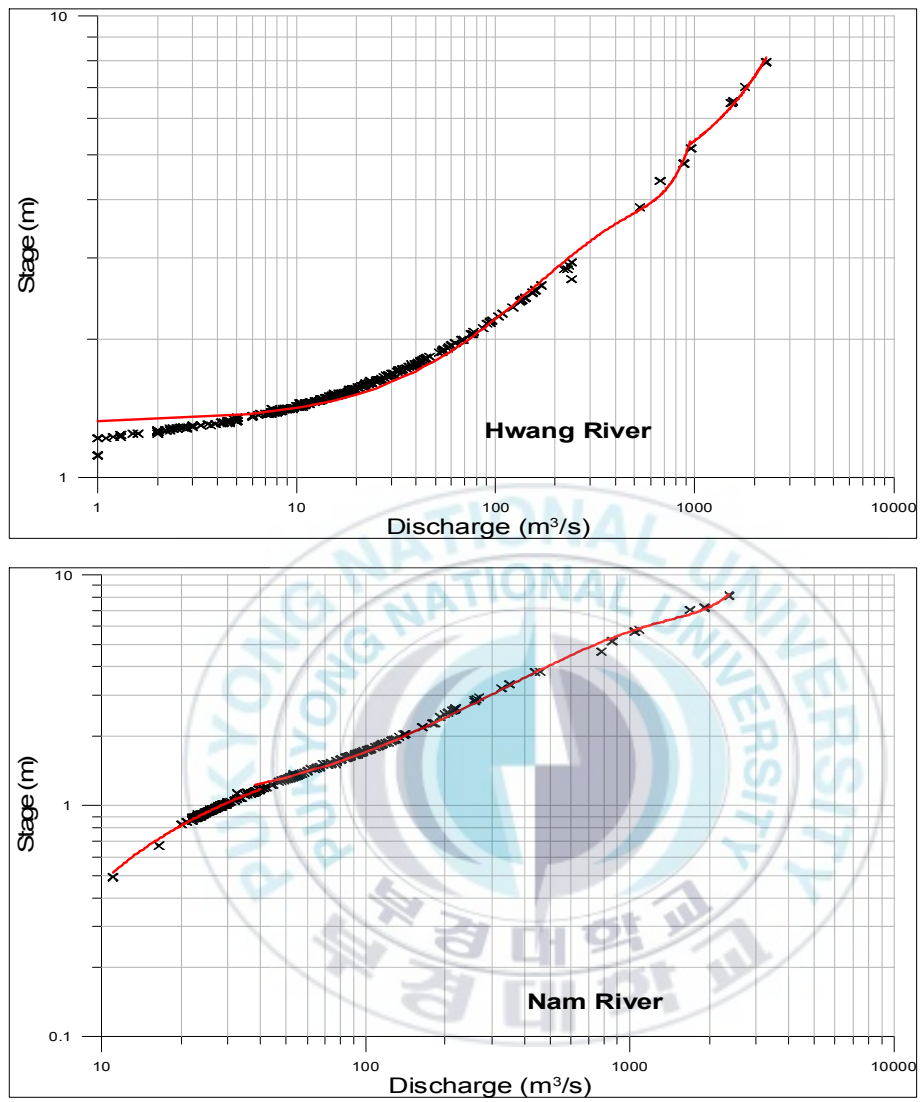


그림 3.3 낙동강 본류 및 지류의 수위-유량 곡선 (계속)

표 3.1 낙동강 본류 및 지류의 수위-유량 곡선식

지 점	수위	수위-유량 곡선식
왜관	$h < 3$	$Q = 162.783h^3 - 1191.88h^2 + 2943.39h - 2374.36$
	$3 \leq h < 10$	$Q = 6.37886h^3 + 16.1535h^2 - 45.7564h - 41.6969$
금호강	$h < 2.2$	$Q = 38.9215h^3 - 177.7483h^2 + 267.429h - 131.176$
	$2.2 \leq h < 5$	$Q = -50.1868h^3 + 586.726h^2 - 1830.13h + 1732.37$
황강	$5 < h$	$Q = -3.34202h^3 + 82.2149h^2 - 150.256h + 67.0698$
	$h \leq 5$	$Q = 2731.35\ln(h) - 3492.86$
남강	$h < 1$	$Q = 4.34013\exp(1.86658h)$
	$1 \leq h < 10$	$Q = 37.5523h^2 - 19.6055h + 12.3685$
회천	$h < 3.85$	$Q = 30.5455\ln(h) - 36.5416$
	$3.85 \leq h < 4.337$	$Q = 1827.45h^3 - 22440.90h^2 + 91852.5h - 125282$
	$4.337 < h$	$Q = 59.0989\ln(h) - 30.1089$

(3) 수질 및 기상자료

WASP 모의에 입력되는 수질자료는 낙동강 조사월보의 8가지 수질항목과 수온을 입력하였으며, 기상자료(기상청, 2003~2005)는 부산지방의 일사량, 일조율이 입력되었다. 모형에 입력되는 수질항목과 기상자료는 표 3.2와 같다.

표 3.2 WASP모형에 입력되는 수질 및 기상자료

항목	단위
Chl-a	$\mu\text{g/L}$
DO	mg/L
BOD	mg/L
$\text{NO}_3\text{-N}$	mg/L
$\text{NH}_4\text{-N}$	mg/L
Organic-N	mg/L
$\text{PO}_4\text{-P}$	mg/L
Organic-P	mg/L
수온	$^{\circ}\text{C}$
일사량	$\text{g} \cdot \text{cal}/\text{cm}^2$
일조율	무차원

(4) 수리계수

모의구간에서 입력되는 수리학적 계수는 대상하천의 유량, 유속 및 수심자료를 회귀분석하여 구하게 되는데 이러한 수리자료는 실측자료를 이용하거나 수리모형을 이용하여 구한다. 수질 모의에 필요한 수리학적 계수인 유속-유량, 수심-유량의 관계상수 및 지수인 a, b, c, d 를 구하기 위해 HEC-RAS 모형을 이용한 결과를 회귀분석 하였다.

대상구간의 수리계수를 표 3.3과 같이 계산하였다. 수리계수 계산에 사용된 식은 다음과 같다.

$$V = aQ^b \quad (3.1)$$

$$D = cQ^d \quad (3.2)$$

$$B = eQ^f \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} Q &= V \cdot A = V \cdot D \cdot B = (aQ^b) \cdot (cQ^d) \cdot (eQ^f) \\ &= (a \cdot c \cdot e)Q^{b+d+f} \end{aligned} \quad (3.4)$$

여기서, V 는 평균유속(m/sec), D 는 평균수심(m), B 는 평균하폭(m), Q 는 유량(m^3/sec), a 는 유속계수(무차원), b 는 유속지수(무차원), c 는 수심계수(무차원), d 는 수심지수(무차원), e 는 하폭계수(무차원), f 는 하폭지수(무차원)이다.

식 (3.4)에서 $(a \cdot c \cdot e)$ 와 $b+d+f$ 는 1이 된다.

표 3.3 모의에 사용된 구간의 수리계수

segment No.	name	a	b	c	d
1	Waegwan	0.1277	0.2968	0.0579	0.5490
2	Nakdong 1	0.1059	0.3254	0.0899	0.4704
3	Nakdong 2	0.1097	0.3265	0.0857	0.4531
4	Nakdong 3	0.0746	0.4535	0.1724	0.3081
5	Geumho	0.2497	0.3041	0.0441	0.5621
6	Geumho 1	0.2421	0.2622	0.0364	0.6085
7	Geumho 2	0.3630	0.3149	0.0315	0.4850
8	Geumho 3	0.3540	0.3210	0.0216	0.4990
9	Geumho 4	0.2418	0.3671	0.0233	0.5940
10	Geumho 5	0.2150	0.5870	0.0278	0.3713
11	Geumho 6	0.0119	0.7694	0.5817	0.2115
12	Nakdong 4	0.0217	0.6231	0.7875	0.1527
13	Neumho 7	0.4479	0.4472	0.0443	0.3946
14	Junction_geumho	0.4130	0.4039	0.0486	0.2626
15	Nakdong 5	0.4047	0.4718	0.0232	0.2221
16	Nakdong 6	0.0074	0.7245	0.9595	0.1342
17	Nakdong 7	0.0271	0.5315	0.2169	0.3490
18	Goryeong	0.0256	0.4936	0.1397	0.4114
19	Nakdong 8	0.0462	0.4382	0.1134	0.3042
20	Nakdong 9	0.2681	0.2748	0.0353	0.4511
21	Nakdong 10	0.2275	0.5963	0.0323	0.3243
22	Nakdong 11	0.4597	0.5234	0.0228	0.3300
23	Nakdong 12	0.4597	0.4845	0.0128	0.3638
24	Hoecheon	0.1548	0.3416	0.1409	0.3899
25	Hoecheon 1	0.1482	0.3624	0.2973	0.4011
26	Nakdong 13	0.0101	0.6781	0.4914	0.1575
27	Hoecheon 2	0.4431	0.2762	0.1266	0.4571
28	Junction_hoecheon	0.0098	0.7051	0.5943	0.1369
29	Hwang	0.4588	0.3284	0.0349	0.5496
30	Hwang 1	0.4136	0.5652	0.0621	0.2813

표 3.3 모의에 사용된 구간의 수리계수 (계속)

segment No.	name	a	b	c	d
31	Nakdong 14	0.0302	0.6660	0.2397	0.1547
32	Hwang 2	0.0453	0.7987	0.5552	0.0634
33	Junction_hwang	0.0316	0.6133	0.2493	0.2180
34	Jeokpo	0.0169	0.6401	0.3962	0.2463
35	Nakdong 15	0.0738	0.3823	0.1847	0.3193
36	Nakdong 16	0.0888	0.3541	0.2742	0.3119
37	Nam	0.1310	0.2873	0.0858	0.5268
38	Nam 1	0.1082	0.2965	0.1004	0.5075
39	Nam 2	0.1650	0.2536	0.1092	0.4297
40	Nam 3	0.1913	0.2196	0.1998	0.3379
41	Nam 4	0.1233	0.2996	0.1613	0.3599
42	Nam 5	0.4328	0.2008	0.0463	0.5207
43	Nakdong 17	0.0916	0.4285	0.3421	0.2669
44	Nam 6	0.4203	0.3021	0.0446	0.4839
45	Junction_nam	0.0628	0.6431	0.1785	0.1611
46	Nakdong 18	0.1407	0.5112	0.0710	0.2730
47	Namji	0.3294	0.1428	0.0675	0.5121
48	Nakdong 19	0.1933	0.4377	0.0699	0.3367
49	Nakdong 20	0.0069	0.7486	1.104	0.1557
50	Nakdong 21	0.0078	0.7180	0.7745	0.1910
51	Nakdong 22	0.0068	0.7261	1.2889	0.0461
52	Hanam	0.0052	0.8173	4.7401	0.1606
53	Nakdong 23	0.0041	0.7087	1.6318	0.1003
54	Mmilyang	0.5460	0.1559	0.0582	0.4185
55	Milyang 1	0.5080	0.4909	0.1101	0.2479
56	Milyang 2	0.0225	0.9707	0.5158	0.0058
57	Milyang 3	0.0046	0.9784	1.4935	0.0151
58	Nakdong 24	0.0015	0.9639	1.6591	0.0144
59	Milyang 4	0.0037	0.9816	1.4075	0.0144
60	Junction_milyang	0.0007	0.9466	3.6266	0.0161

표 3.3 모의에 사용된 구간의 수리계수 (계속)

segment No.	name	a	b	c	d
61	Nakdong 25	0.0009	0.9502	2.9962	0.0117
62	Nakdong 26	0.0008	0.9790	3.2503	0.0124
63	Nakdong 27	0.0007	0.9846	5.9063	0.0093
64	Nakdong 28	0.0006	0.9817	4.2972	0.0172
65	Mulgeum	0.0007	0.9845	3.4335	0.0062
66	Nakdong 29	0.0007	0.9882	4.3745	0.0020
67	Nakdong 30	0.0004	0.9878	4.0860	0.0104
68	Nakdong 31	0.0004	0.9864	3.8815	0.0126
69	Nakdong 32	0.0004	0.9881	4.4560	0.0052
70	Nakdong 33	0.0004	0.9908	5.7492	0.0013
71	Nakdong 34	0.0003	0.9915	4.5188	0.0068
72	Haguduk	0.0003	0.9915	3.9537	0.0079

3.1.3 동물성 플랑크톤과 식물성 플랑크톤의 관계

WASP모형으로 모의 할 때 실제 관측된 Chl-a를 적절히 모의하기 위하여 동물성 플랑크톤의 개체수를 입력하였으며, 입력된 세부 종으로는 운충류의 *Brachionus angularis*, *Keratella cochlearis*, *Polyarthra* spp, 지각류의 *Bosmina deitersi*, *Bosmina longirostris*, 요각류의 *Cyclops copepodids*가 있다. 표 3.4는 동물성 플랑크톤과 식물성 플랑크톤의 관계를 나타내는 물금 지점의 중별 섭식률이다.

표 3.4 물금 지점의 출현 중별 섭식률 (Kim 등, 2000)

	세부 종	SFR (mL/animal · day)
운충류	<i>Asplanchna priodonta</i>	0.185±0.210
	<i>Brachionus angularis</i>	0.052±0.041
	<i>Brachionus calyciflorus</i>	0.597±0.827
	<i>Brachionus quadridentatus</i>	0.153±0.178
	<i>Brachionus rubens</i>	0.029±0.015
	<i>Colurella obtusa</i>	not found
	<i>Conochiloides dossuarius</i>	not found
	<i>Filinia longiseta</i>	0.035±0.037
	<i>Hexarthra mira</i>	0.210±0.154
	<i>Keratella cochlearis</i>	0.001±0.001
	<i>Keratella valga</i>	0.002±0.001
	<i>Lecane</i> spp.	0.001±0.001
	<i>Monostyla bulla</i>	0.001±0.001
	<i>Polyarthra</i> spp.	0.111±0.057
	<i>Synchaeta oblonga</i>	0.045±0.002
	<i>Trichocerca</i> spp.	0.010±0.009
지각류	<i>Bosmina deitersi</i>	0.057±0.045
	<i>Bosmina longirostris</i>	0.157±0.297
	<i>Daphnia longispina galeata</i>	0.257±0.375
	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	0.453±0.275
	<i>Moina</i> sp.	0.101±0.153
요각류	<i>Cyclops copepodids</i>	0.258±0.210
	Nauplii	0.101±0.125

3.1.4 WASP모형의 매개변수 추정

모형의 매개변수 추정은 시행착오법으로 추정하였으며, WASP 모의에서 보정을 위한 매개변수 값은 표 3.5에 나타내었다. 표 3.5는 각 매개변수에 대한 개략적인 최대값과 최소값을 제시하였으며, 이 값의 범위를 넘어서는 값은 Bowie 등(1985)이 제시한 최대·최소값을 사용하였다.

표 3.5 WASP모형의 매개변수 추정

Constants	Value	Min.	Max.
Ammonia			
Nitrification rate @20°C	0.13	0	10
Nitrification temperature coefficient	1.08	0	10.7
Half Saturation: nitrification oxygen limit	0.5	0	2
Nitrate			
Denitrification rate @20°C	0.09	0	0.09
Denitrification temperature coefficient	1.04	0	1.04
Half saturation: denitrification oxygen limit	0.1	0	0
Organic nitrogen			
Dissolved organic nitrogen mineralizaion rate @20c	0.075	0	1.08
Dissolved organic nitrogen mineralizaion rate @20c temperature coefficient	1.08	0	1.08
Organic nitrogen decay in sediments	0.0004	0	0.0004
Organic nitrogen decay in sediments temperature coefficient	1.08	0	1.08

표 3.5 WASP모형의 매개변수 추정 (계속)

Constants	Value	Min.	Max.
Cholorophyll-a			
Phytoplankton maximum growth rate @20℃	5	0	3
Phytoplankton growth temperture coefficient	1.041	0	1.07
Phytoplankton light formulation switch (1=Steele, 2=Smith)	1	1	2
Phytoplankton carbon: chlorophyll ratio	50	0	200
Phytoplankton optimal light saturation	350	0	350
Phytoplankton half-saturation constant for nitrogen	0.001	0	0.05
Phytoplankton half-saturation constant for phosphorus	0.005	0	0.05
Phytoplankton endogenous respiration rate @20℃	0.02	0	0.5
Phytoplankton respiration temperature coefficient	1.045	0	1.08
Phytoplankton zooplankton grazing rate constant	0.001	0	5
Phytoplankton phosphorus: carbon ratio	0.001	0	0.24
Phytoplankton nitrogen: carbon ratio	0.001	0	0.43
Dissolved oxygen			
Calc reaeration option (0=Covar, 1=O'Connor, 2=Owens, 3=Churchill, 4=Tsvoglou)	1	0	4
Global reaeration rate at 20℃, per day	10	0	10
Theta -- reaeration temperature correction	1.03	0	1.03
Oxygen: carbon stoichiometric ratio	2.67	0	2.67
BOD1 (ultimate)			
BOD (1) decay rate @20℃	0.001	0	5.6
BOD (1) decay rate temperature correction	1.047	0	1.07
BOD (1) half saturation oxygen limit	0.5	0	0.5

3.2 동물성 플랑크톤을 이용한 수질모의

보통 국내·외의 WASP 모의에 관한 연구에서는 식물성 플랑크톤의 성장률과 사멸률로 모의를 하였다. 그러나 본 연구에서는 식물성 플랑크톤의 성장률과 동물성 플랑크톤의 섭식률로 모의를 하였다. 모형에 입력된 동물성 플랑크톤의 개체수는 부산대 생물학과에서 측정한 자료(2003~2005)를 사용하였다.

3.2.1 모형의 보정

WASP모형의 보정은 2003년 1월 1일부터 2003년 12월 15일까지 하였다. 모형의 모의는 chl-a를 중심으로 하였으며, 모의간격과 출력간격은 각각 1일로 모의하였다. 모형의 보정결과는 그림 3.4~3.13으로 나타냈다. 시간에 따른 모의결과를 비교하기 위해 Gupta 등(1999)이 제시한 4가지 통계량으로 평가하였다(표 3.6).

통계량은 제공근 평균오차(root mean square error; RMSE), 평균 편차의 비율(percent bias; PBIAS), Nash-Sutcliffe 효율성 지수(Nash-Sutcliffe efficiency; NSE), 지속 모형 효율성 지수(persistence model efficiency; PME)이다. 통계량에 관계된 식은 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{1/N \sum_{t=1}^N (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2} \quad (3.5)$$

$$PBIAS = \sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_t^{sim}) / \sum_{t=1}^N q_t^{obs} \times 100 \% \quad (3.6)$$

$$NSE = 1 - \sum_{t=1}^N (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2 / \sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q^{mean})^2 \quad (3.7)$$

$$PME = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2}{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_{t-1}^{obs})^2} \quad (3.8)$$

여기서, q_t^{sim} 은 t 시간의 모의농도($\mu\text{g/L}$, mg/L), q_t^{obs} 는 관측농도($\mu\text{g/L}$, mg/L), N 은 관측자료의 수, q^{mean} 은 관측농도의 평균($\mu\text{g/L}$, mg/L), q_{t-1}^{obs} 는 $t-1$ 시간의 관측농도($\mu\text{g/L}$, mg/L)이다.

첫 번째 통계량인 RMSE의 단위는 $\mu\text{g/L}$, mg/L 이고, 최적값은 ‘0’이다. 두 번째 통계량인 PBIAS의 단위는 %이고, NSE와 PME는 무차원이다.

RMSE는 단순히 모형 예측 오차의 표준편차를 계산하는 것이며, 값이 작을수록 모형의 성능이 더 좋음을 나타낸다. PBIAS는 모의항목의 농도가 관측된 농도에 비해 크거나 작은 정도에 대한 평균적인 경향을 측정한다. 최적값의 경우 ‘0’ 이고, 양수인 경우 과소추정, 음수인 경우 과대추정되는 방향으로 모형의 오차가 발생함을 의미한다. NSE는 관측값의 분산에 대한 잔차 분산의 상대적인 크기에 대한 척도이고, 최적값은 ‘1’이며 최소한 ‘0’ 을 초과해야만 받아들일 수 있는 성능을 보인다고 할 수 있다. 값이 ‘0’ 인 경우는 모형의 모의에 비해 관측값의 평균을 사용하는 것이 더 낫다는 것을 의미한다. PME는 오차의 분산에 대한 잔차 분산(잡음)의 상대적인 크기를 나타낸다. 최적값은 ‘1’ 이고 값은 ‘0’ 을 초과해야 받아들일 수 있는 최소한의 모형성능이라고 할 수 있다.(강신욱과 이상호, 2007)

표 3.6 모형 보정의 결과를 비교하기 위한 통계량

수질항목	RMSE	PBIAS	NSE	PME
Chl-a	23.55	2.70	0.558	0.755
DO	0.94	2.28	0.871	0.948
BOD	0.68	-5.85	0.303	0.695
NH ₄ -N	0.14	-47.43	0.399	0.082
NO ₃ -N	0.38	-2.61	0.394	0.827
Organic-N	0.14	-12.34	0.898	0.933
Total-N	0.39	-7.15	0.601	0.888
PO ₄ -P	0.03	-36.46	0.225	0.157
Organic-P	0.04	5.61	0.156	-0.027
Total-P	0.05	-22.93	0.297	0.526

(1) Chl-a

Chl-a의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.4와 같다. 1월, 2월, 12월의 경우 동물성 플랑크톤이 관측되지 않았기 때문에 관측값과 모의값의 차이가 보다 크게 나는 것으로 생각된다. 나머지 기간의 경우는 관측값과 모의값이 비슷하게 모의되었다. 예측오차의 표준편차인 RMSE는 23.55이며, PBIAS는 2.7 %로 관측값보다 작게 모의되었다. NSE는 0.588이고, PME는 0.755로 모의값이 관측값에 적절히 모의되었다

(2) DO

DO의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.5와 같다. DO의 경우 RMSE는 0.94, PBIAS는 2.28 %, NSE와 PME는 0.588, 0.755로 모두 최적값에 가까우며, 관측값에 적절하게 모의되었다.



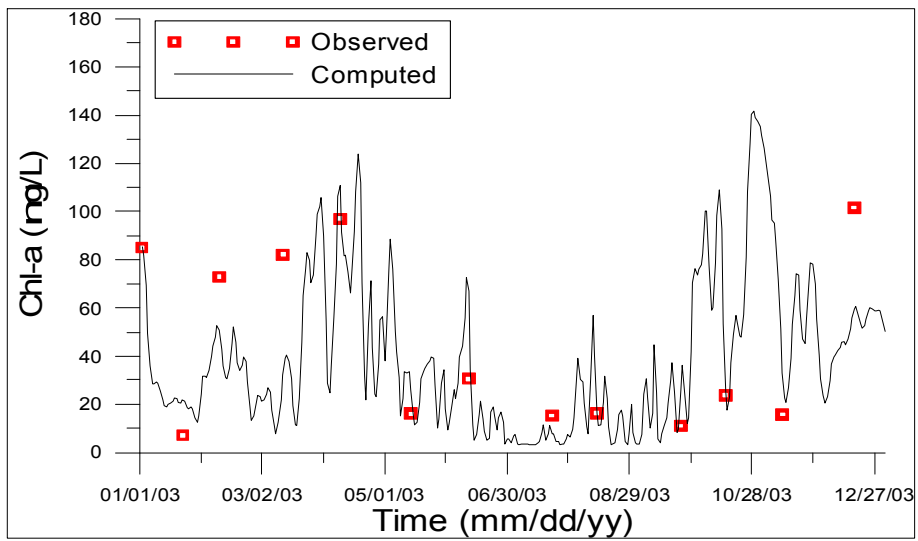


그림 3.4 물금의 Chl-a 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)

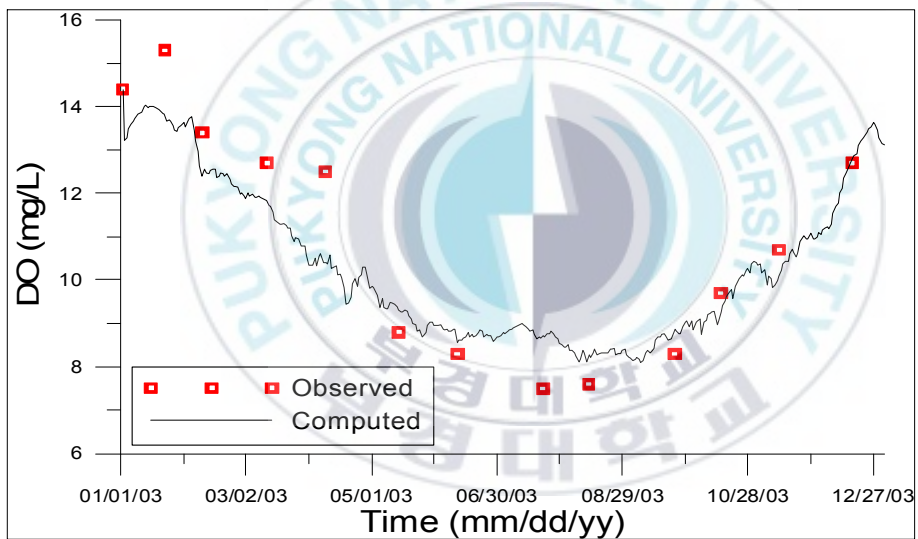


그림 3.5 물금의 DO 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)

(3) BOD

BOD의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.6과 같다. RMSE는 0.68로 0에 가까운 값이다. PME는 0.695이고, PBIAS는 -5.85 %로 관측값보다 평균적으로 크게 모의되었다. NSE는 0.303이며, 12월의 모의값과 관측값의 오차 때문에 작게 결정된 것으로 보인다.

(4) $\text{NH}_4\text{-N}$

$\text{NH}_4\text{-N}$ 의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.7과 같다. RMSE는 0.14로 최적값인 0에 가깝지만, PBIAS는 -47.43 %로 관측값보다 크게 모의되었다. $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 측정할 때 페놀을 사용하여 측정하기 때문에 시료가 쉽게 변질될 수 있다. 그러므로 측정할 때 오차가 나타난 것으로 생각된다. NSE는 0.399이고, PME는 0.082로 최소값인 0에 가까웠다.



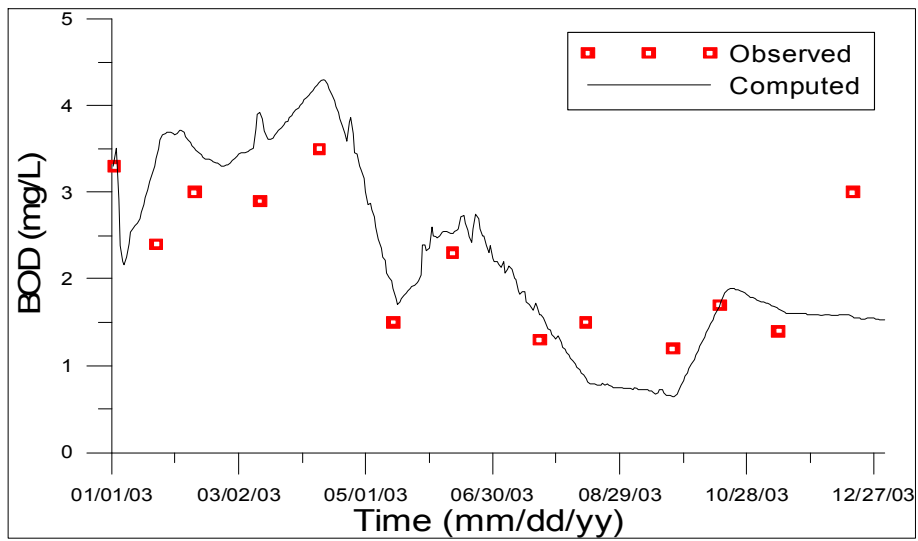


그림 3.6 물금의 BOD 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)

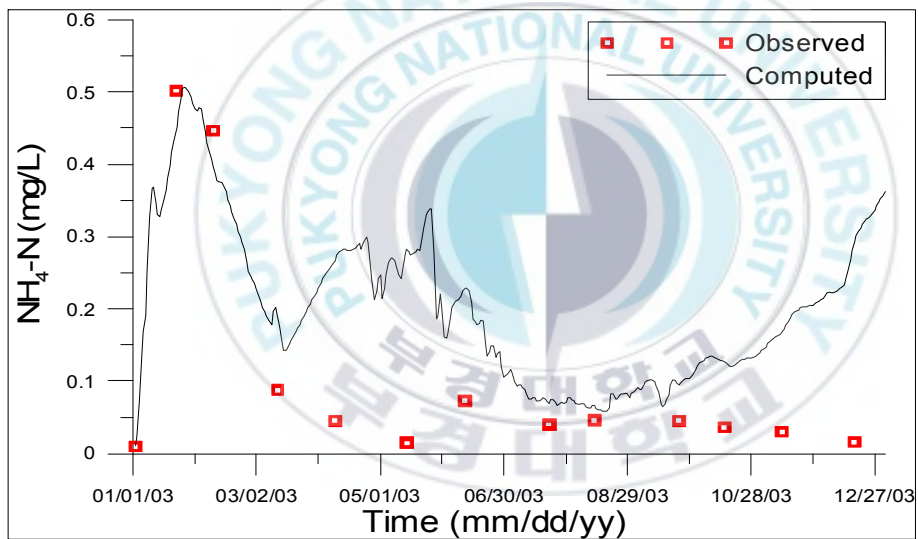


그림 3.7 물금의 NH₄-N 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)

(5) $\text{NO}_3\text{-N}$

$\text{NO}_3\text{-N}$ 의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.8과 같다. RMSE는 0.38, PBIAS는 -2.61 %, PME는 0.827이며, 최적값에 가깝게 모의되었다. NSE가 0.394인 것은 관측값과 모의값의 차이가 크기 때문이다.

(6) Organic-N

Organic-N의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.9와 같다. Organic-N은 모형의 보정에서 DO와 함께 가장 잘 모의된 항목 중 하나이다. RMSE는 0.38, NSE는 0.898, PME는 0.933이다. PBIAS는 -12.34 %로 관측값보다 조금 크게 모의되었다.



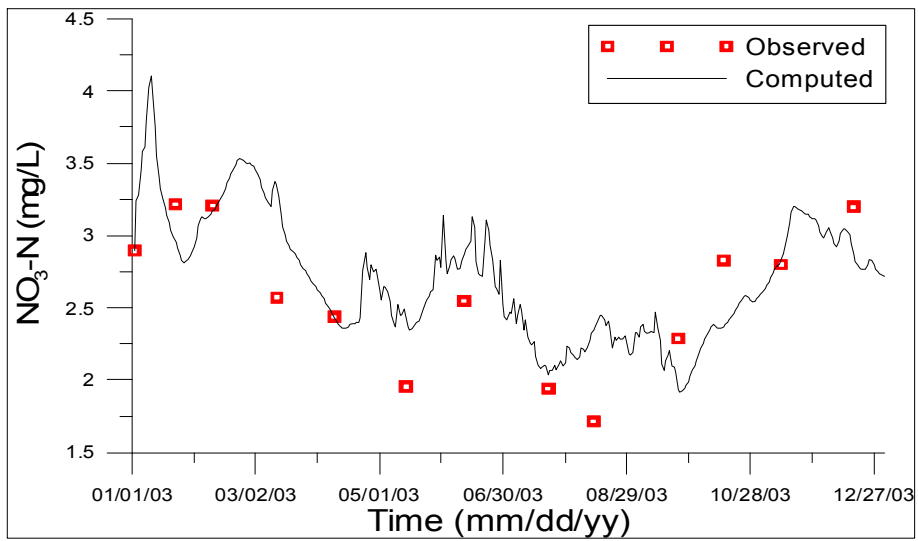


그림 3.8 물금의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)

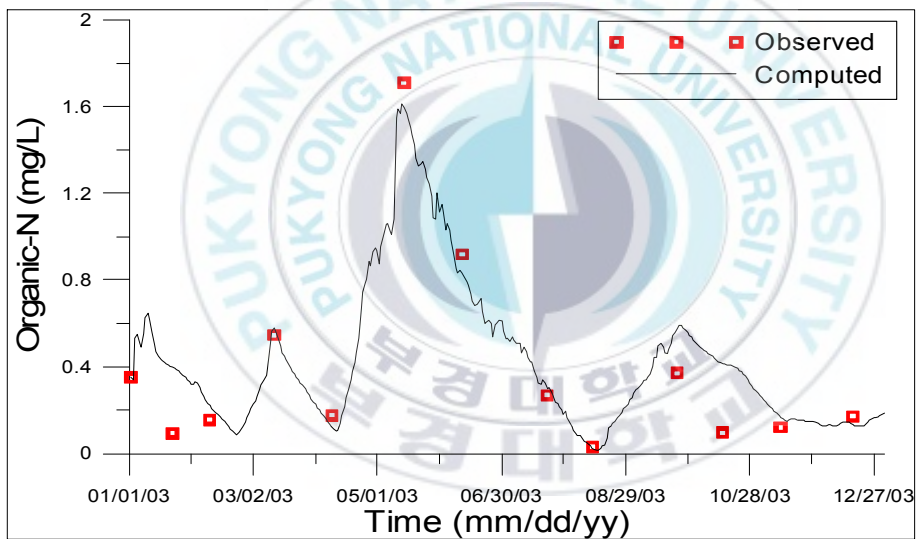


그림 3.9 물금의 Organic-N 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)

(7) Total-N

Total-N의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.10과 같다. 상대적으로 3월과 8월의 모의값이 관측값과 차이가 컸다. RMSE는 0.39, PBIAS는 -7.15 %, NSE는 0.601, PME는 0.888로 관측값에 적절하게 모의되었다.

(8) $\text{PO}_4\text{-P}$

$\text{PO}_4\text{-P}$ 의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.11과 같다. RMSE는 0.03으로 최적값인 0에 가깝지만, NSE와 PME는 0.225, 0.157로 최소값에 가깝게 모의되었다. PBIAS는 -36.46 %이다. 5월과 9월을 제외하고 관측값보다 크게 모의되었다.



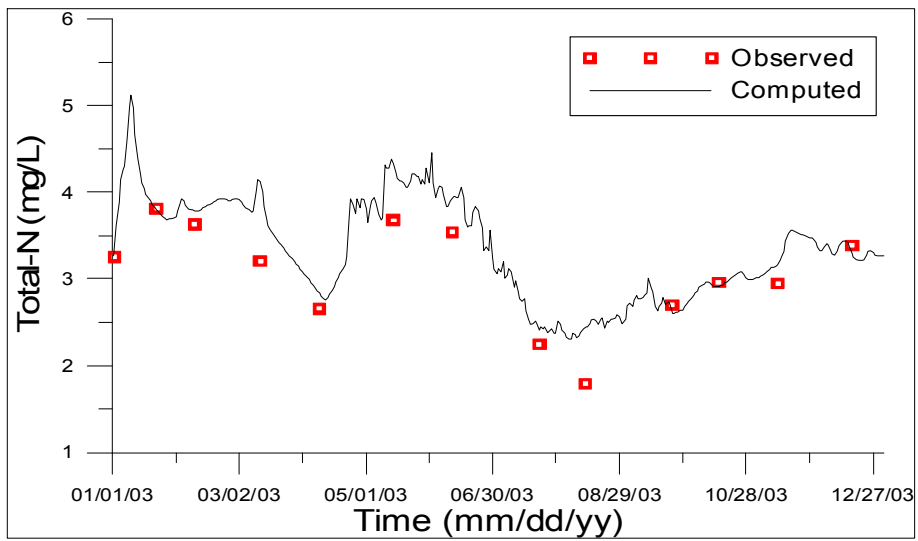


그림 3.9 물금의 Total-N 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)

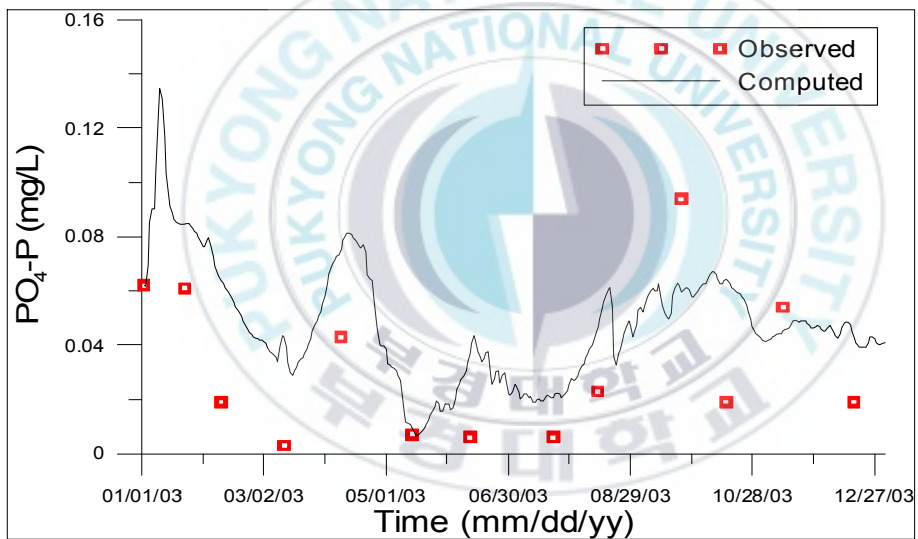


그림 3.10의 물금 PO₄-P 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)

(9) Organic-P

Organic-P의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.12와 같다. RMSE는 0.04, PBIAS는 5.61 %로 최적값에 가깝지만, NSE는 0.156으로 최소값에 가깝다. PME는 최소값보다 작은 -0.027이며, 모의가 적절하지 않음을 나타내고 있다.

(10) Total-P

Total-P의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.13과 같다. RMSE는 0.05, NSE는 0.297, PME는 0.526이다. PBIAS가 -22.93 %로 관측값보다 크게 모의되었다. 1월에서 4월까지의 모의결과가 관측값보다 컸기 때문이다.



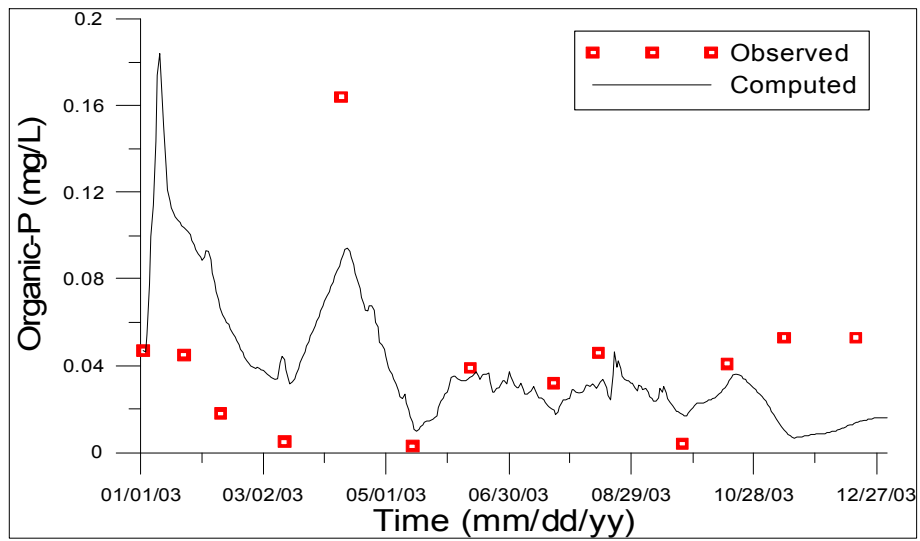


그림 3.12 물금의 Organic-P 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)

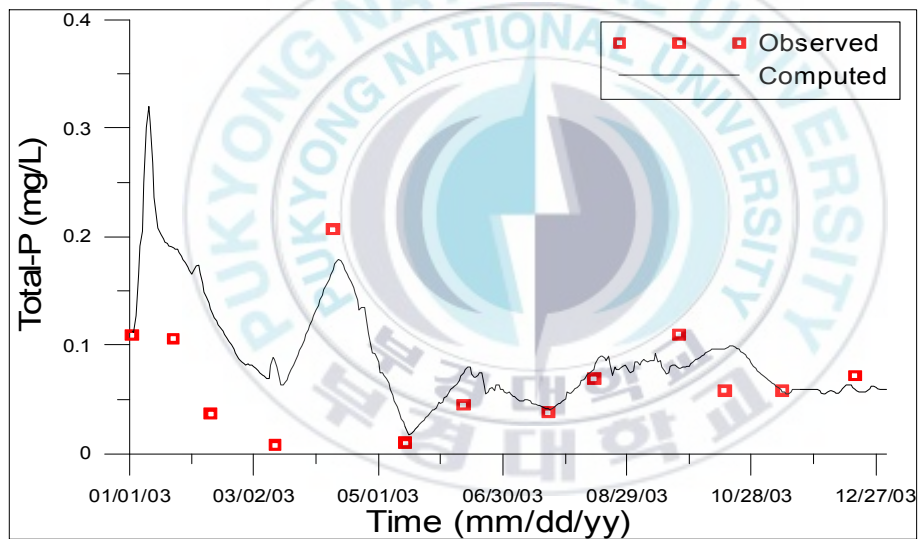


그림 3.13 물금의 Total-P 관측값과 모의값 비교(모형의 보정)

3.2.2 모의된 Chl-a와 입력 자료의 비교

모의 결과와 입력 자료를 비교하기 위하여 모의된 2003년의 Chl-a와 입력 자료로 사용된 유량, 동물성 플랑크톤의 개체수, 수온, 일사량, 일조율이 사용되었다. 그리고 Chl-a와 강우량의 관계도 나타내기 위해 2003년의 강우량 자료가 사용되었다. 모의된 Chl-a와 입력 자료를 비교한 그래프는 그림 3.14, 3.15와 같다.

그림 3.14에서는 유량, 강우량이 증가하는 5월에서 10월사이의 구간에는 Chl-a의 농도가 낮게 분포되었으며, 동물성 플랑크톤의 개체수가 관측될 때 Chl-a의 농도가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림 3.15는 수온이 증가할 때 Chl-a의 농도가 같이 증가하고 있다. Chl-a의 그래프와 일사량, 일조율의 그래프는 거의 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 6월과 7월사이 세 그래프 모두 모의기간 중 가장 작은 결과를 나타내는 것을 알 수 있다.



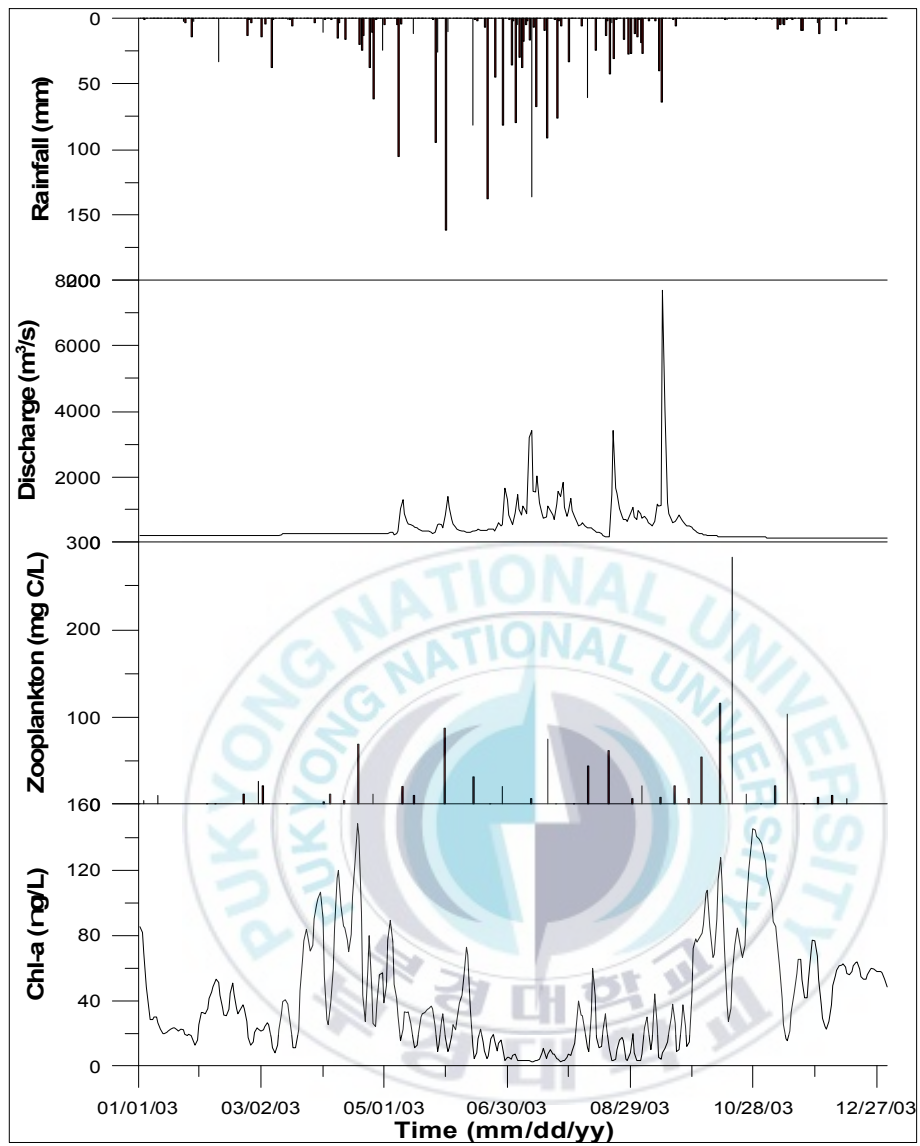


그림 3.14 강우량, 유량, 동물성 플랑크톤 개체수와 Chl-a의 비교

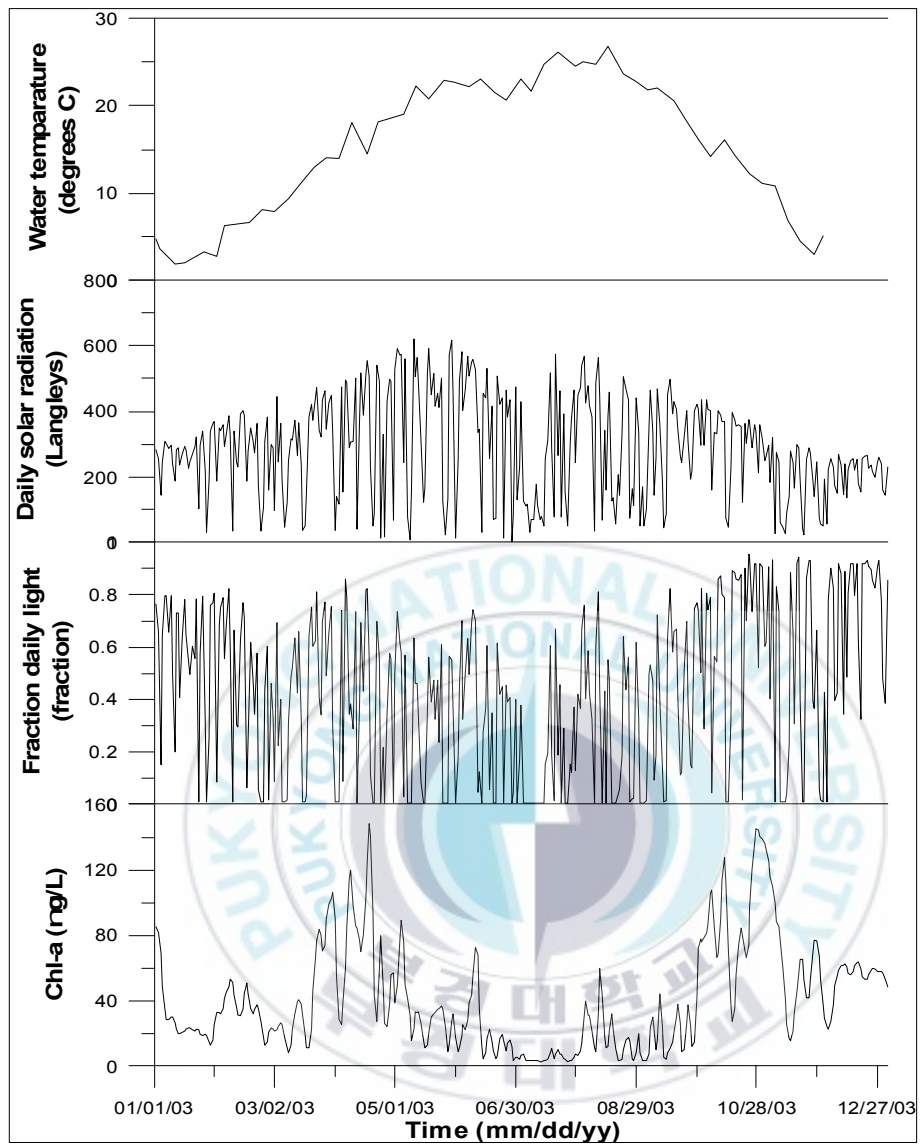


그림 3.15 수온, 일사량, 일조율과 Chl-a의 비교

3.2.3 모형의 검증

모형의 검증기간은 2003년 12월 16일부터 2005년 12월 31일까지 하였다. 모형의 모의는 Chl-a를 중심으로 하였으며, 모의간격과 출력간격의 1일로 모의하였다. 모형의 검증에서 시간에 따른 모의값과 관측값을 비교한 결과를 보정 결과와 함께 나타냈다(그림 3.16~3.25). 검증결과를 비교하기 위해 제공된 평균오차, 평균 편차의 비율, Nash-Sutcliffe 효율성 지수, 지속 모형 효율성 지수를 구하였다(표 3.7).

표 3.7 모형 검증 결과를 비교하기 위한 통계량

수질항목	RMSE	PBIAS	NSE	PME
Chl-a	28.86	18.86	0.565	0.531
DO	1.27	1.46	0.777	0.776
BOD	1.36	1.96	-0.175	-1.600
NH ₄ -N	0.13	-45.94	0.128	-0.039
NO ₃ -N	0.45	-3.04	0.325	0.464
Organic-N	0.30	30.75	0.348	0.331
Total-N	0.41	-2.03	0.522	0.713
PO ₄ -P	0.03	-26.73	-0.283	0.031
Organic-P	0.03	19.20	0.198	0.077
Total-P	0.03	-13.73	0.078	0.482

(1) Chl-a

Chl-a의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.16과 같다. RMSE는 28.86 %, NSE는 0.565, PME는 0.531이다. PBIAS는 18.86으로 모형의 보정기간 보다 작게 모의 되었다.

(2) DO

DO의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.17과 같다. RMSE는 1.27, PBIAS는 1.46 %, NSE는 0.777, PME는 0.776으로 관측값과 비슷하게 모의되었다. 2005년 6~8월의 모의결과는 상대적으로 관측값과 모의값의 차이가 크게 났다.



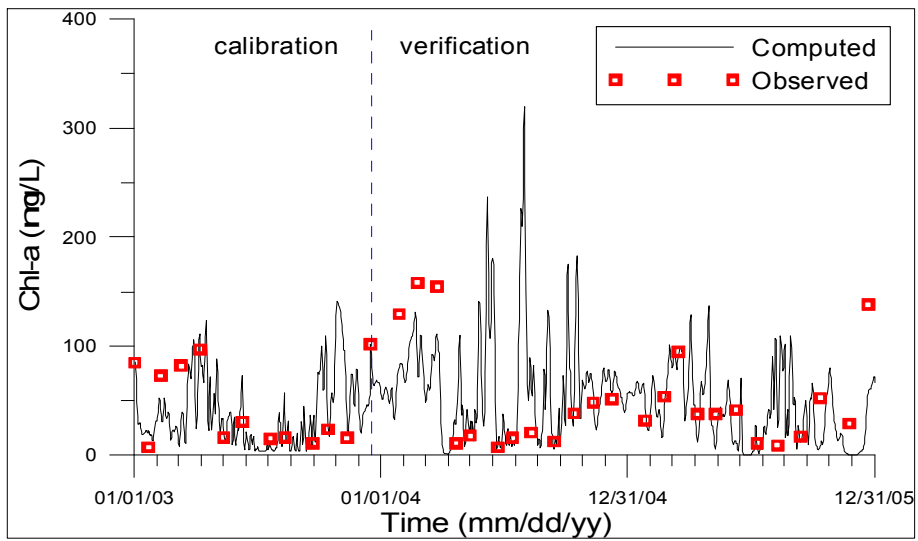


그림 3.16 물금의 Chl-a 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)

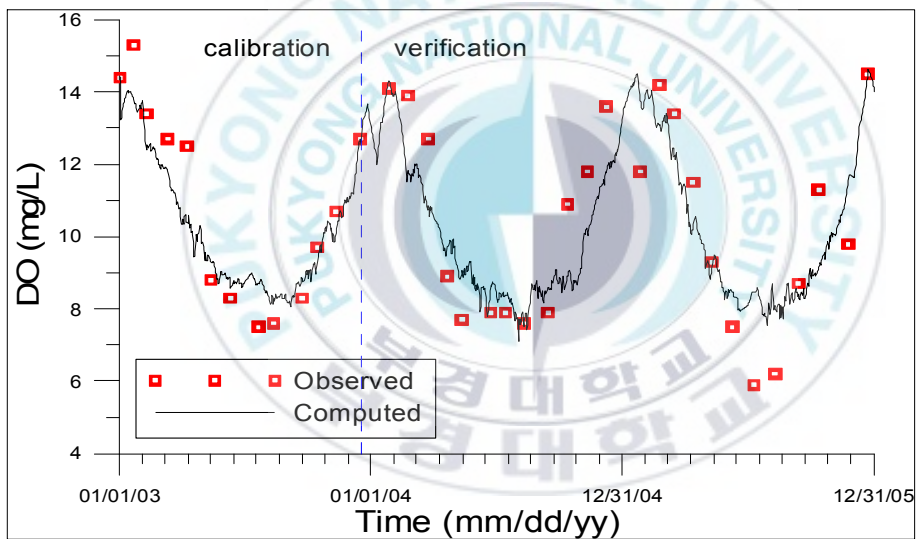


그림 3.17 물금의 DO 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)

(3) BOD

BOD의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.18과 같다. 모형의 보정에서는 관측값과 모의값이 비슷하게 모의되었다. 검증에서는 RMSE는 1.36, PBIAS는 1.96 %로 0에 가까운 결과를 나타냈다. 그러나 NSE와 PME는 -0.175, -1.600으로 최소값인 0보다 작으므로 모의가 적절하지 않다고 할 수 있다.

(4) $\text{NH}_4\text{-N}$

$\text{NH}_4\text{-N}$ 의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.19와 같다. 보정의 결과와 같이 모의값과 관측값이 차이가 큰 것은 측정오차의 영향이 큰 것으로 생각된다. RMSE는 0.13으로 적절하지만, PBIAS는 -45.94 %로 관측값보다 크게 모의되었다. NSE는 0.128이고, PME는 -0.039로 최소값보다 작은 결과를 나타내고 있다.

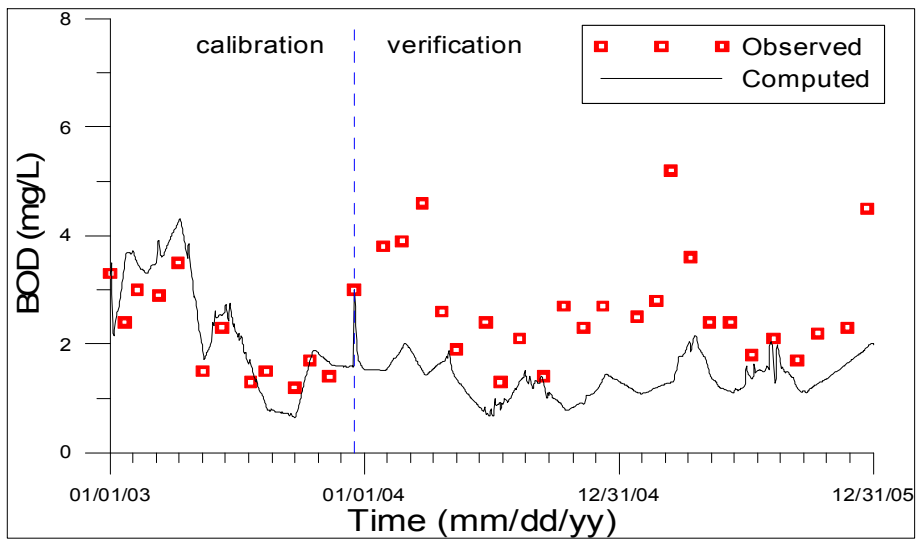


그림 3.18 물금의 BOD 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)

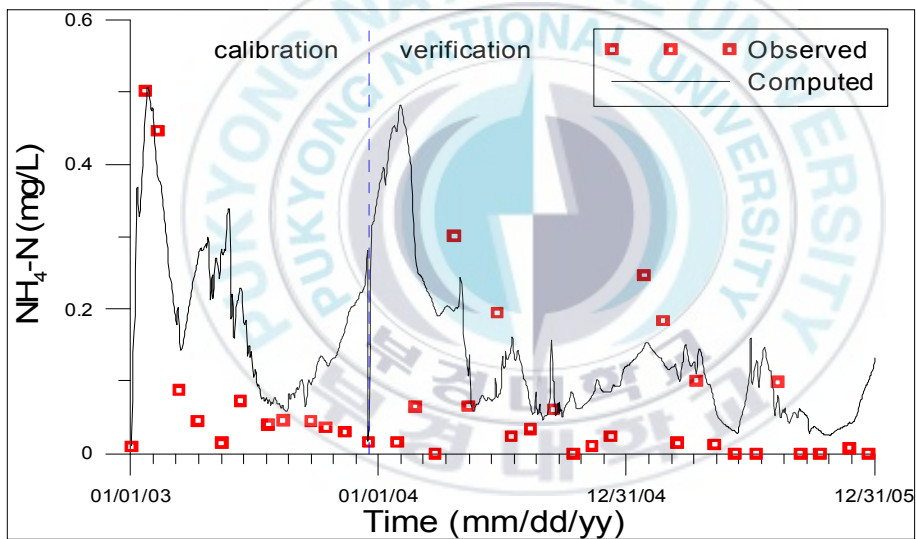


그림 3.19 물금의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)

(5) $\text{NO}_3\text{-N}$

$\text{NO}_3\text{-N}$ 의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.20과 같다. RMSE는 0.45, PBIAS는 -3.04 %, NSE는 0.325, PME는 0.464이다. 2005년의 1월과 8월을 제외하고는 관측값과 모의값이 적절하게 모의되었다.

(6) Organic-N

Organic-N의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.21과 같으며, 보정에서는 관측값과 모의값이 거의 일치하였다. RMSE는 0.30, NSE는 0.348, PME는 0.331이다. 2005년의 8월과 11월, 12월의 오차가 크게 나타났다. PBIAS는 30.75 %로 관측값보다 전체적으로 작게 모의되었다.



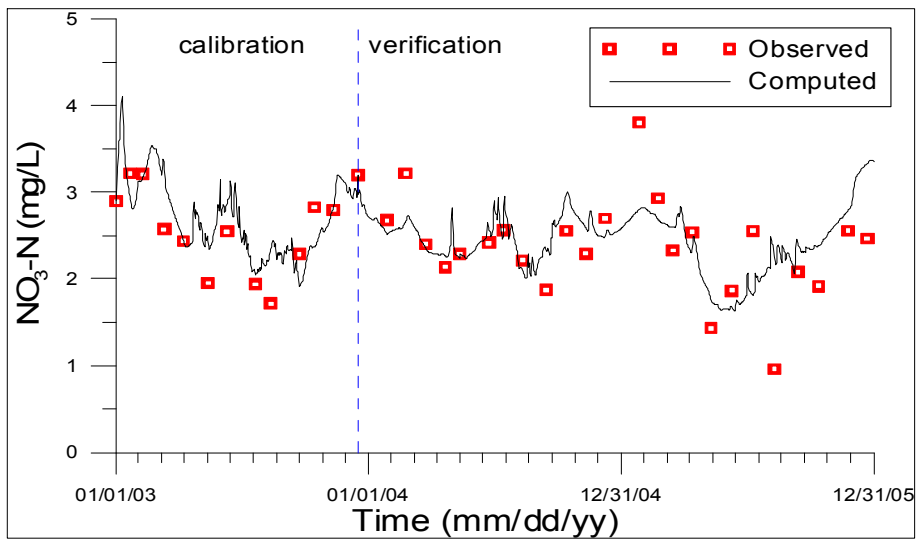


그림 3.20 물금의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)

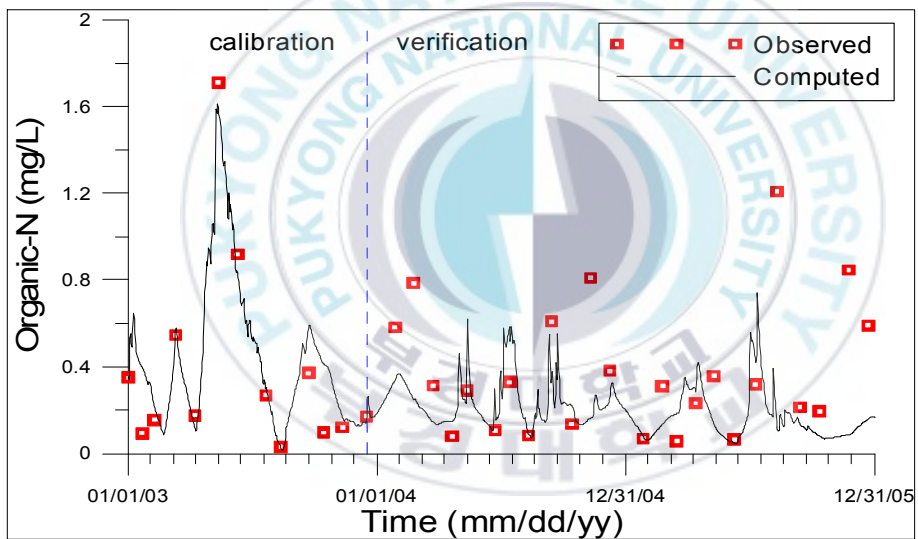


그림 3.21 물금의 Organic-N 관측값과 모의값 비교
(모형의 검증)

(7) Total-N

Total-N의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.22와 같다. RMSE는 0.41로 최적값에 가깝고, PBIAS는 -2.03 %로 관측값과 비슷한 경향을 보이고 있다. NSE는 0.522, PME는 0.713이다. 모형 보정의 결과와 검증의 결과가 비슷하며, 비교적 잘 모의된 것으로 나타났다.

(8) $\text{PO}_4\text{-P}$

$\text{PO}_4\text{-P}$ 의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.23과 같다. RMSE는 0.03으로 최적값인 0에 가깝고, PBIAS는 -26.73 %로 관측값보다 크게 모의되었다. PMS는 0.031로 최소값에 가깝고, NSE는 -0.283으로 모의가 적절하지 못한 것을 나타낸다.



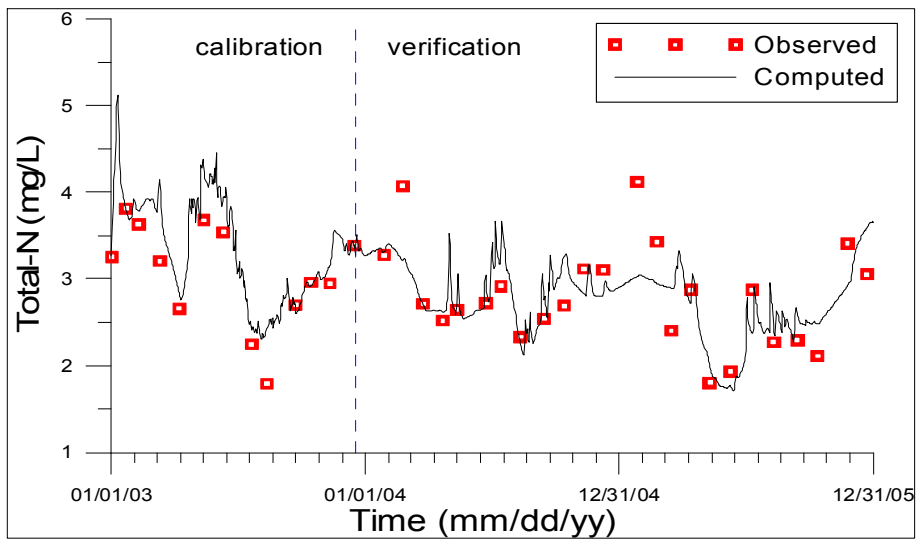


그림 3.22 물금의 Total-N 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)

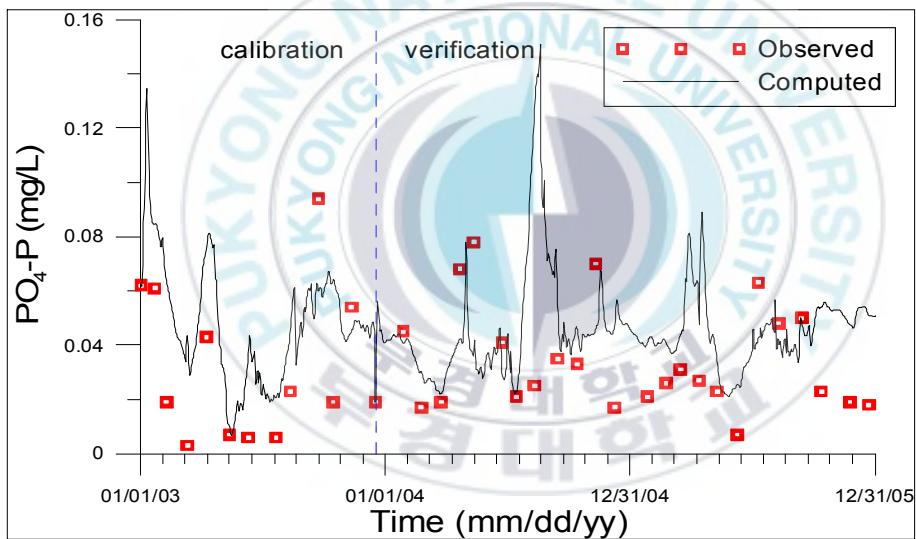


그림 3.23 물금의 PO₄-P 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)

(9) Organic-P

Organic-P의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.24와 같다. RMSES는 0.03, PBIAS는 19.20 %, NSE는 0.198이다. PME는 0.077로 최소값에 가까운 값이다. 2004년 7월 이후로 관측값과 비교한 결과 모의가 적절하지 못한 것을 나타낸다.

(10) Total-P

Total-P의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 3.25와 같으며, RMSE는 0.03, PBIAS는 -13.73 %로 조금 크게 모의되었다. PME는 0.482로 적절하지만 NSE가 0.078로 최소값에 가깝다. 검증기간에서 모의값의 결과는 거의 변화가 없으며, 관측값의 평균값에 가까운 결과를 보인다.



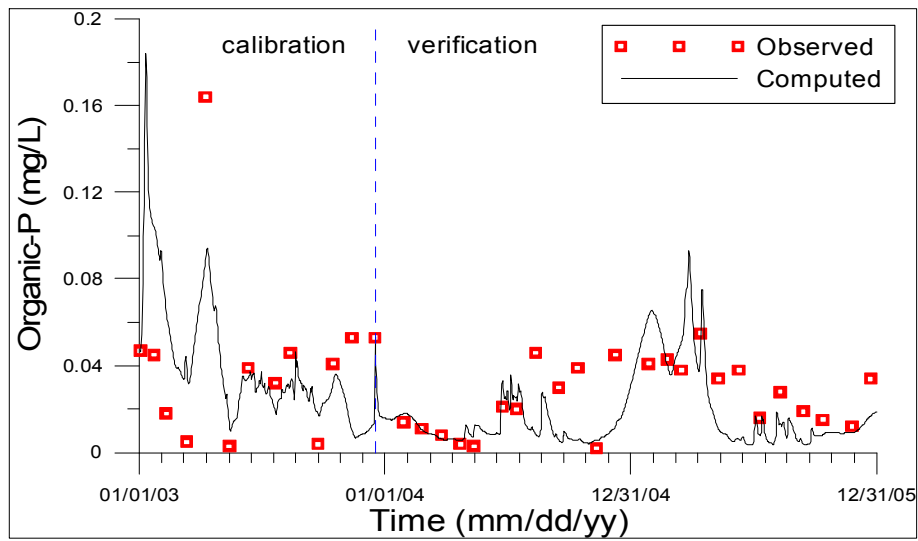


그림 3.24 물금의 Organic-P 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)

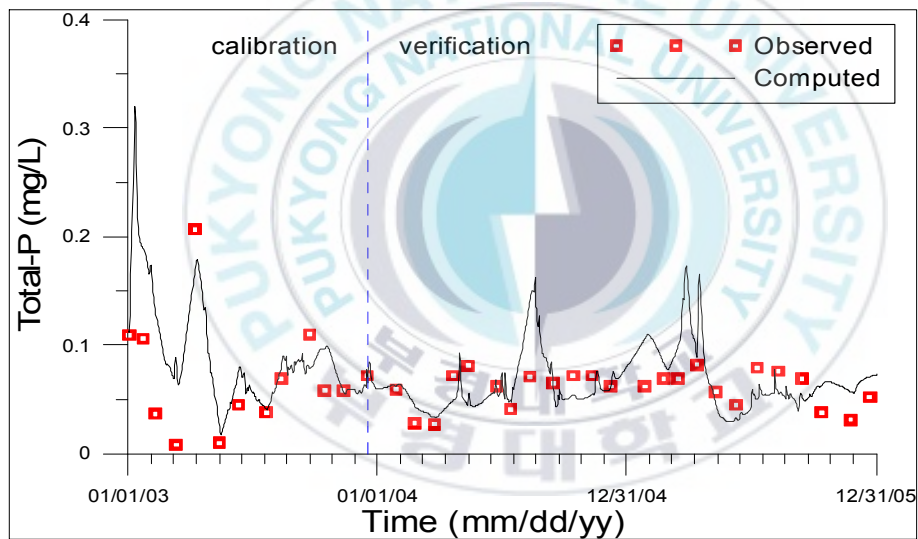


그림 3.25 물금의 Total-P 관측값과 모의값 비교(모형의 검증)

3.2.4 동물성 플랑크톤 개체수와 식물성 플랑크톤 사멸률을 이용한 수질모의 비교

본 연구에서는 WASP모형에 입력되는 Chl-a의 사멸률 대신 동물성 플랑크톤 개체수를 입력하여 수질을 모의하였다. 동물성 플랑크톤 개체수를 입력한 모의결과와 Chl-a의 사멸률을 입력한 모의결과를 비교하였으며 (그림 3.26), 제공된 평균오차, 평균 편차의 비율, Nash-Sutcliffe 효율성 지수, 지속 모형 효율성 지수를 구하였다(표 3.8). 모의에 입력되는 매개 변수는 모두 같게 고정하였다.

모형의 보정기간에서는 동물성 플랑크톤 개체수를 입력한 결과와 Chl-a의 사멸률을 입력한 결과가 비슷하게 모의되었다. 모형의 검증기간에서 통계량을 분석한 결과 PBIAS는 Chl-a의 사멸률을 입력한 것이 50 % 이상 크게 모의되었다. PME의 경우 -1.397로 최소값인 0보다 작기 때문에 모의가 적절하지 않았다.

이 결과 동물성 플랑크톤의 개체수를 입력하여 모의하는 것이 Chl-a의 사멸률을 입력하여 모의하는 것보다 관측값에 더 정확히 모의되는 것으로 나타났다.

표 3.8 Chl-a의 모의결과를 비교하기 위한 통계량

통계량	동물성 플랑크톤 개체수를 입력한 결과	Chl-a의 사멸률을 입력한 결과
RMSE	28.86	82.12
PBIAS	18.87	-39.95
NSE	0.565	-1.397
PME	0.531	0.382

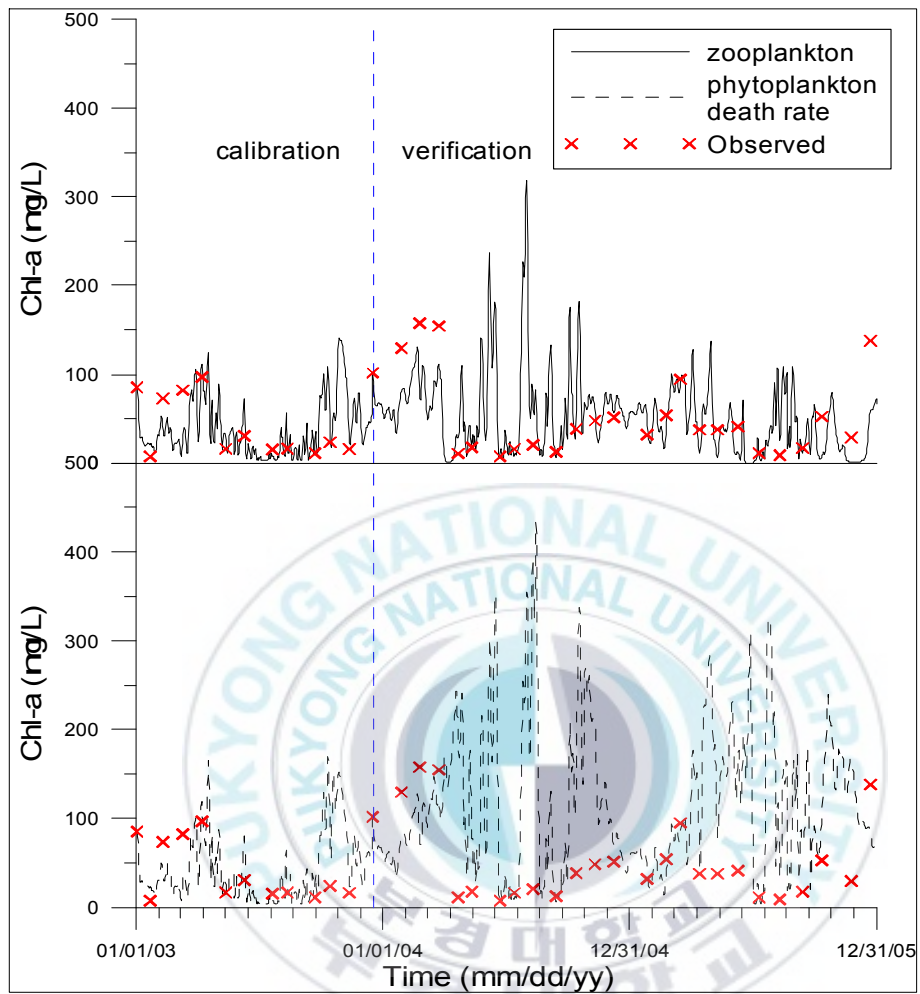


그림 3.26 동물성 플랑크톤 개체수와 식물성 플랑크톤 사멸률을
이용한 Chl-a의 비교

3.3 민감도 분석

매개변수들의 민감도를 확인하기 위하여 보정 시 입력된 값을 중심으로 10 % 씩 상하로 변화시켰다. Chl-a를 중심으로 수질측정지점 하류부인 물금 지점의 민감도 계수를 산정하였다. 민감도 계수에 사용된 식은 아래와 같으며 민감도 계수가 클수록 관련 매개변수에 대해 민감하다고 할 수 있다.

$$\text{민감도 계수}(\%) = \left(\frac{\text{매개변수 변화에 의한 결과} - \text{모형보정의 결과}}{\text{모형보정의 결과}} \right) \times 100$$

여러 입력변수 중 Chl-a의 특성을 파악할 수 있는 상수와 시간함수(time functions)의 매개변수에 대해 민감도 분석을 하였다. 민감도 분석에 사용된 상수는 Chl-a 성장률, 동물성 플랑크톤 섭식률, 유기인 반포화상수, 인변화율, 질소 변화율이 있으며, 시간함수는 유량, 수온, 일사량, 일조율이 사용되었다.

표 3.9는 민감도 계수를 나타낸 매개변수의 민감도이다. 그림 3.27, 3.28은 표 3.6에서 나타낸 매개변수의 민감도를 나타낸 그래프이다.

민감도 분석의 결과 상수는 Chl-a의 성장률, 유기인 반포화상수, 동물성 플랑크톤 섭식률, 인 변화율, 질소 변화율의 순서로 민감하였으며, 질소 변화율의 경우는 변화가 나타나지 않았다. 시간함수의 경우 유량, 수온, 일조율, 일사량의 순서로 민감하게 반응하였다.

표 3.9 모형에 사용된 매개변수의 민감도

매개변수	10 % 증가	10 % 감소
Chl-a 성장률	14.2	-12.94
동물성 플랑크톤 섭식률	-0.74	0.77
유기인 반포화 상수	-1.72	1.81
인 변화율	-0.07	0.07
질소 변화율	0.00	0.00
유량	-14.59	4.27
수온	7.39	-6.46
일사량	3.44	-4.12
일조율	9.66	-9.86

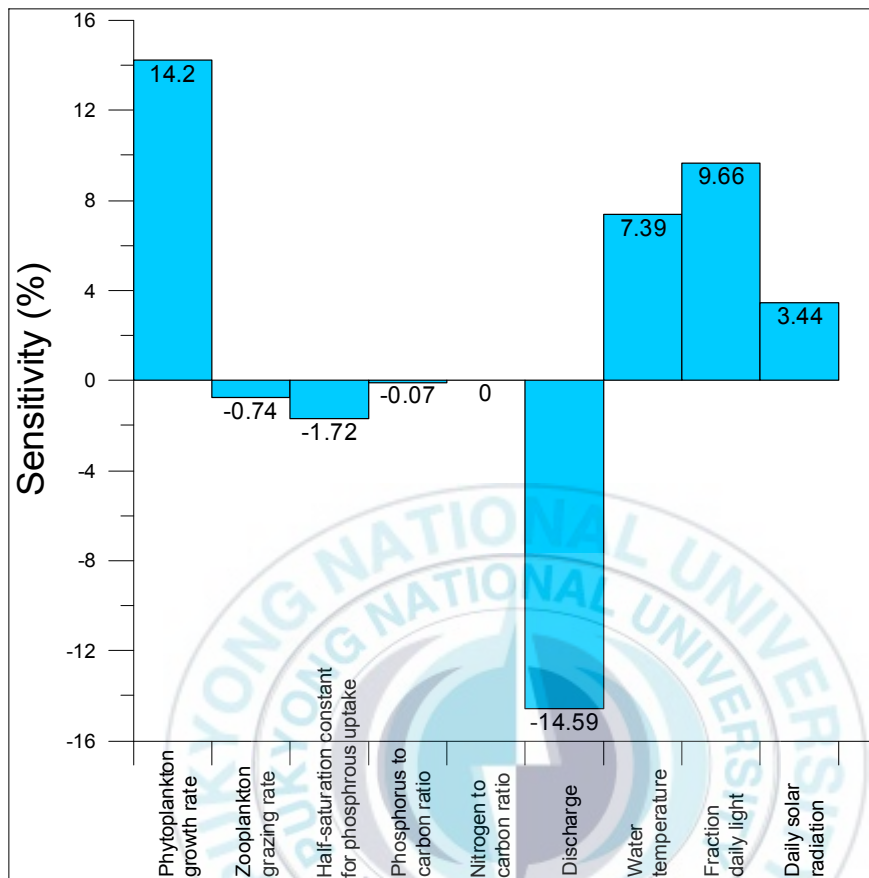


그림 3.27 매개변수를 10 % 증가 시켰을 때 민감도

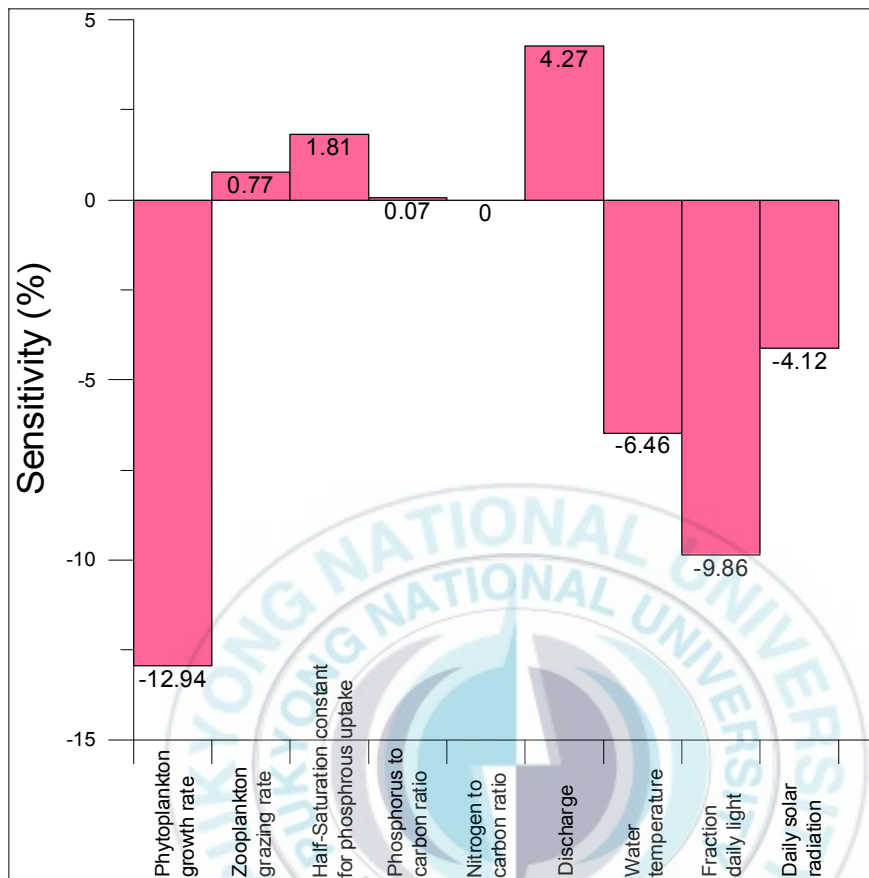


그림 3.28 매개변수를 10 % 감소 시켰을 때 민감도

3.3.1 상수의 민감도 분석 결과

(1) Chl-a 성장률

Chl-a 성장률에 대한 민감도는 그림 3.29와 같다. 9월과 2월 사이의 겨울에 Chl-a 성장률에 대한 영향이 크게 나타났으며 최대 23 %의 민감도 변화를 보였다.

(2) 동물성 플랑크톤 섭식률

동물성 플랑크톤 섭식률에 대한 민감도는 그림 3.30과 같다. 동물성 플랑크톤 섭식률의 영향은 보정값에 10 % 감소시켰을 경우 10월에 5.89 %, 11월에 3.8 %로 9월에서 11월 사이의 가을에 민감하게 반응하였다.



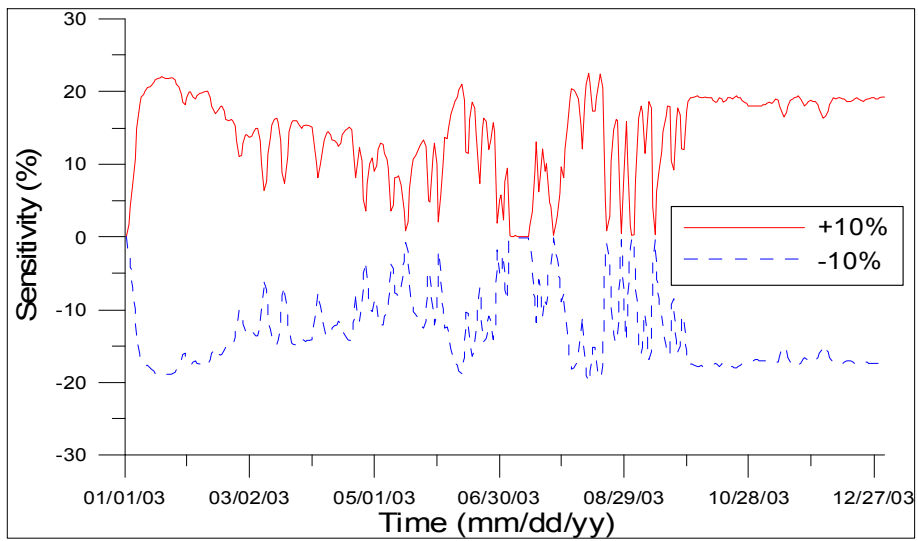


그림 3.29 Chl-a 성장률의 민감도

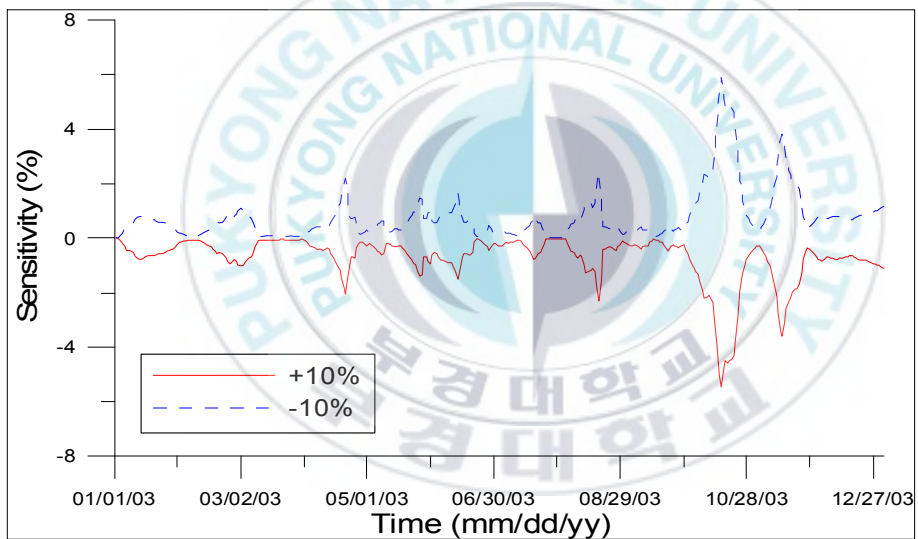


그림 3.30 동물성 플랑크톤 섭식률의 민감도

(3) 유기인 반포화상수

유기인 반포화 상수에 대한 민감도는 그림 3.31과 같다. 유기인 반포화 상수의 영향은 보정값에 10 %감소시켰을 경우 5월에 4.84 %, 6월에 4.11 %로 가장 크게 나타났으며, 평균적으로 10월 이후 민감하게 반응하였다.

(4) 인 변화율

인 변화율에 대한 민감도는 그림 3.32와 같다. 인 변화율의 영향은 10월과 5월에 0.36 %로 민감도가 가장 크게 나타났다. 5월~6월, 9월~11월 사이인 봄과 가을에 민감하게 반응하였다.



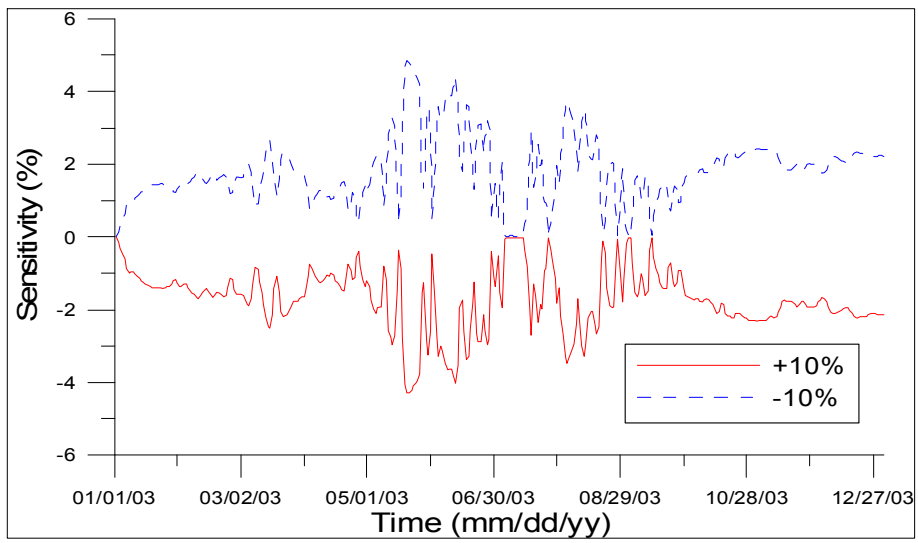


그림 3.31 유기인 반포화 상수의 민감도

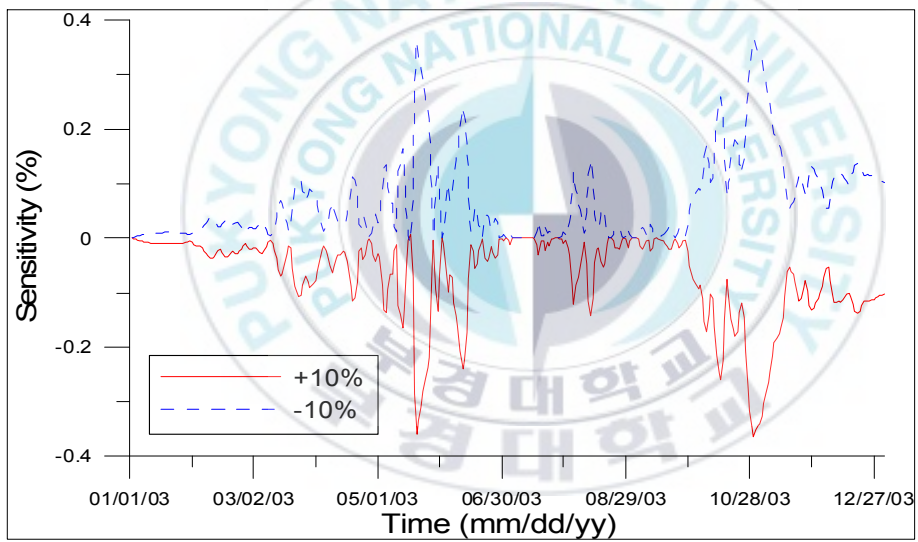


그림 3.32 인 변화율에 대한 민감도

(5) 질소 변화율

질소 변화율에 대한 민감도는 그림 3.33과 같다. 질소 변화율의 영향은 보정값에 대하여 10 % 증가, 감소 시켰을 때 Chl-a의 농도변화에는 영향이 없는 것으로 나타났다.

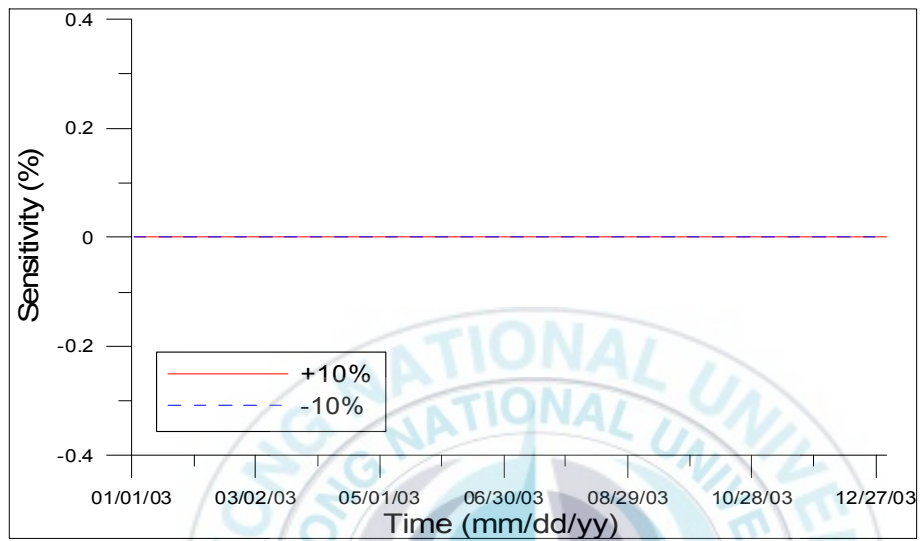


그림 3.33 질소 변화율에 대한 민감도

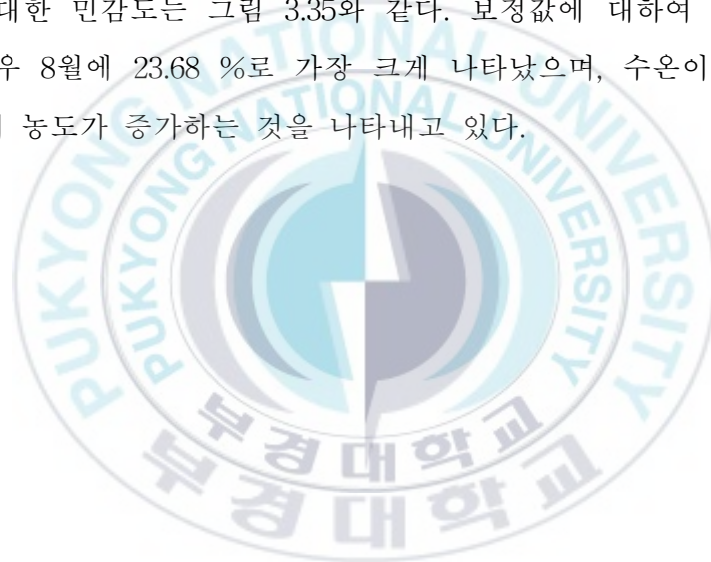
3.3.2 시간함수의 민감도 분석 결과

(1) 유량

유량변화에 대한 민감도는 그림 3.34와 같다. 보정값에 대하여 10 % 증가시켰을 경우 6월에 38.15 %로 가장 민감했고 보정값에 10 % 감소시켰을 경우는 여름보다 겨울에 민감하게 반응하였다. 유량을 증가 또는 감소시켰을 때는 연 중 유량이 큰 여름에는 Chl-a의 농도 변화가 거의 없었다. 그러나 유량이 작은 계절에는 10 %를 변화 시키면, Chl-a의 농도 변화가 크게 나타났다.

(2) 수온

수온변화에 대한 민감도는 그림 3.35와 같다. 보정값에 대하여 10 % 증가시켰을 경우 8월에 23.68 %로 가장 크게 나타났으며, 수온이 증가할수록 Chl-a의 농도가 증가하는 것을 나타내고 있다.



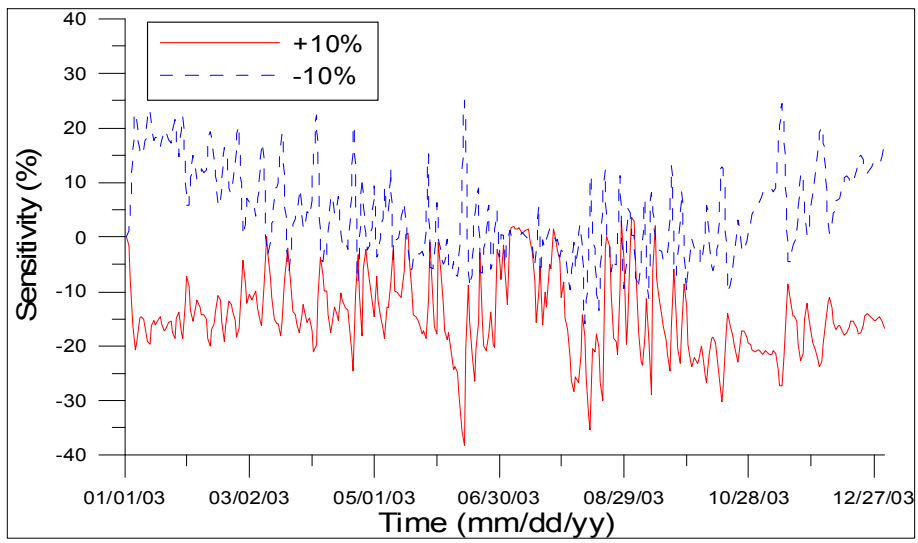


그림 3.34 유량변화에 대한 민감도

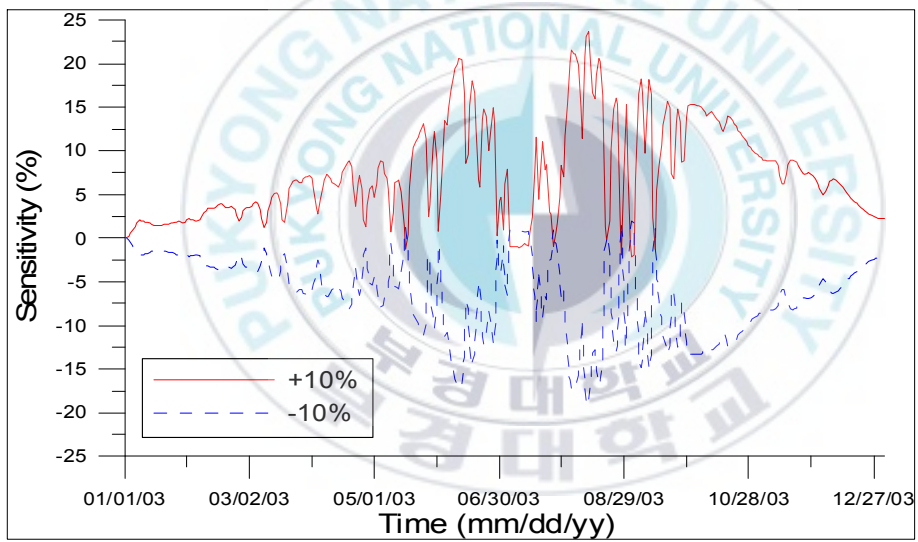


그림 3.35 수온변화에 대한 민감도

(3) 일사량

일사량에 대한 민감도는 그림 3.36과 같다. 12월에 11 %로 가장 민감하게 나타났다. 여름은 민감도의 변화가 거의 없지만 10월부터 3월까지 민감하게 반응하였다.

(4) 일조율

일조율에 대한 민감도는 그림 3.37과 같다. 보정값에 대하여 10 % 증가시켰을 경우 8월에 22.97 %로 가장 민감하게 나타났다. 겨울보다는 여름에 민감도가 크게 나타났지만, 일조율의 변화에 대해서는 전체적으로 민감하게 반응하였다.



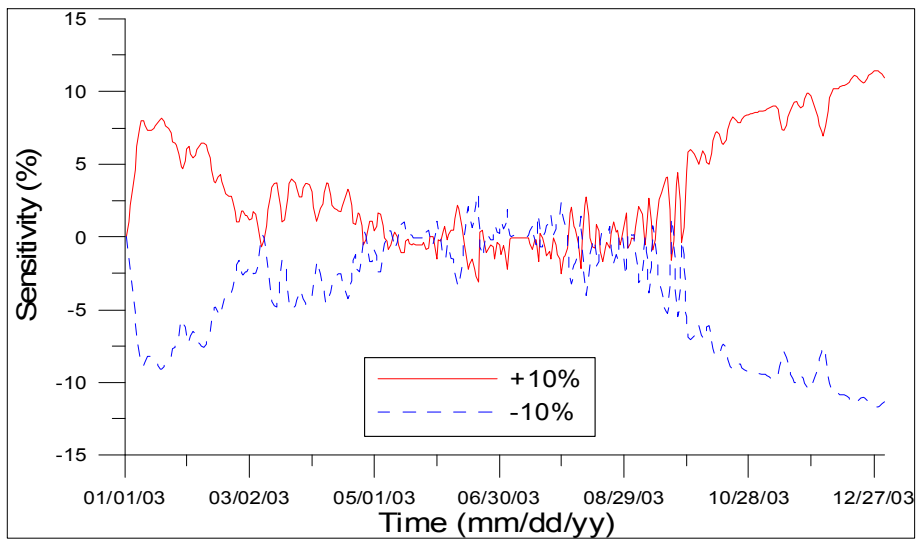


그림 3.36 일사량변화에 대한 민감도

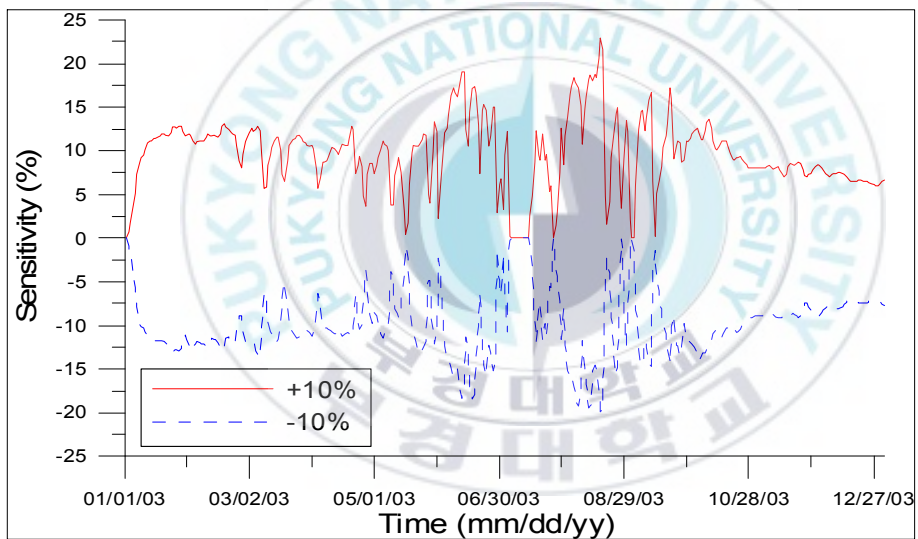


그림 3.37 일조율변화에 대한 민감도

4 신경망모형을 이용한 동물성 플랑크톤 예측

WASP모형의 모의에서 입력된 동물성 플랑크톤은 측정을 하기가 어렵고, 수질항목에서 빠져 있으므로 자료를 구하기가 어렵다. 그래서 본 연구에서는 신경망모형 중 다층퍼셉트론(multi-layer perceptron)을 이용하여 동물성 플랑크톤을 예측하고자 한다. 신경망에 사용된 학습방법은 지도학습의 역전파 알고리즘(back-propagation algorithm)을 사용하였다.

4.1 동물성 플랑크톤의 예측결과 비교

4.1.1 학습 기간에 따른 동물성 플랑크톤 예측

학습 자료에 대한 동물성 플랑크톤 예측은 두 가지 경우에 대하여 예측을 하였다. 첫 번째 경우는, WASP 모의에 사용된 2003년부터 2004년까지 모형에 입력된 8가지 수질항목과 수온, 유량을 학습하여 2005년의 동물성 플랑크톤을 예측하였다(그림 4.1). 두 번째 경우는, 부산대 생물학과에서 측정한 1994년부터 2004년까지의 수온, DO, NO₃-N, PO₄-P를 학습하여 2005년의 동물성 플랑크톤을 예측하였다(그림 4.2). 예측결과를 비교하기 위해 제공된 평균오차(RMSE), 평균 편차의 비율(PBIAS), Nash-Sutcliffe 효율성 지수(NSE), 지속 모형 효율성 지수(PME)를 구하였다. (표 4.1)

첫 번째 경우, 동물성 플랑크톤 개체수의 예측이 잘되지 않았으며, 시간에 따른 변화가 관측값을 모사하지 못하고 3월 이후로는 거의 일정하게 나타났다(그림 4.1). PBIAS는 0.19 %로 0에 가깝지만, PME가 -2.599로 모의가 적절하지 않았다. 학습에 사용되는 매개변수는 많았지만, 학습기간이 2년으로 자료의 수가 많지 않았기 때문인 것으로 생각한다.

두 번째 경우, 학습에 사용된 매개변수의 수는 적었지만 학습기간이 11

년으로 길었다. PBIAS는 3.01 %로 조금 크게 모의되었고, RMSE와 NSE는 각각 0.14, 0.534로 적절했다. 예측된 동물성 플랑크톤의 경향도 관측값과 비슷하게 나타났다(그림 4.2).

표 4.1 학습기간에 의해 예측된 동물성 플랑크톤 통계량

통계량	10개의 매개변수로 2년간 학습	4개의 매개변수로 11년간 학습
RMSE	0.20	0.14
PBIAS	0.19	3.01
NSE	0.137	0.534
PME	-2.599	0.050

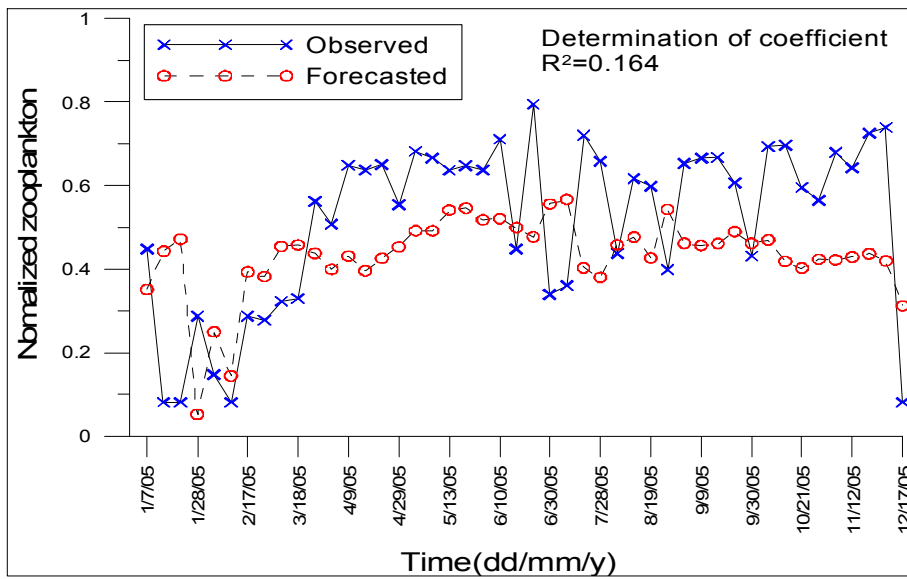


그림 4.1 동물성 플랑크톤의 관측값과 예측값 비교
(10개의 매개변수로 2년간 학습)

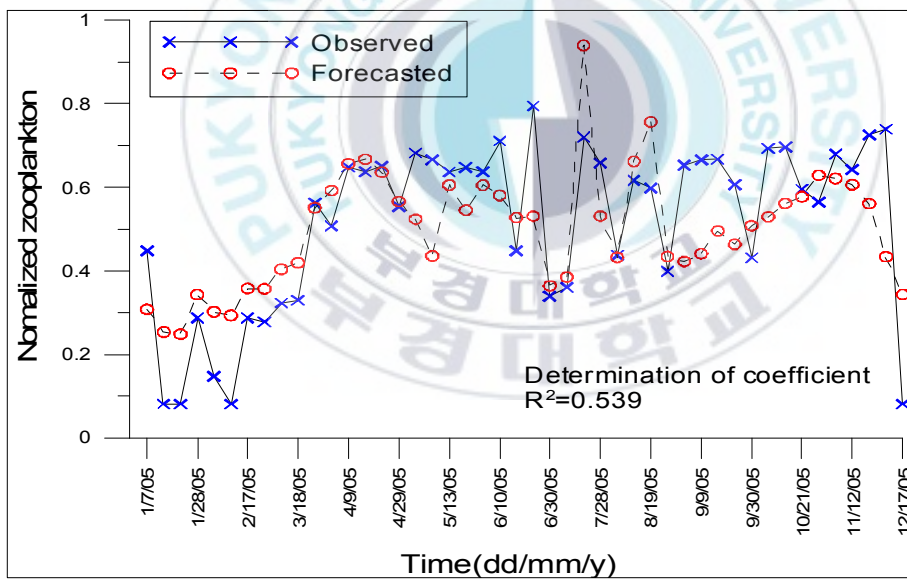


그림 4.2 동물성 플랑크톤의 관측값과 예측값 비교
(4개의 매개변수로 11년간 학습)

4.1.2 학습 횟수에 따른 예측결과 비교

동물성 플랑크톤의 예측에 사용되는 학습 자료는 1994년부터 2004년까지의 수온, DO, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 로 선정하였다. 그리고 신경망에 사용되는 학습 횟수에 따른 동물성 플랑크톤을 예측하였으며, 학습 횟수는 1,000번, 5,000번, 10,000번으로 변화시키면서 예측결과를 관측값과 비교하였다(그림 4.3~4.5). 그리고 제공된 평균오차(RMSE), 평균 편차의 비율(PBIAS), Nash -Sutcliffe 효율성 지수(NSE), 지속 모형 효율성 지수(PME)를 나타내었다.(표 4.2)

예측된 동물성 플랑크톤의 통계량 분석결과 RMSE는 학습 횟수의 변화에 거의 일정했다. PBIAS는 학습 횟수를 5,000번으로 예측한 결과가 0에 가장 가까웠으며, NSE는 학습 횟수가 늘어날수록 1에 가까워졌다. PME는 학습 횟수를 10,000번으로 예측한 결과를 제외하고 음수값을 나타냈다. 학습 횟수를 10,000번으로 예측한 동물성 플랑크톤의 개체수가 관측값에 가장 적절하게 예측되었다.

표 4.2 학습 횟수 의해 예측된 동물성 플랑크톤 통계량

통계량	학습 횟수 1000	학습 횟수 5000	학습 횟수 10000
RMSE	0.15	0.15	0.14
PBIAS	5.90	0.44	3.01
NSE	0.433	0.499	0.534
PME	-5.165	-1.78	0.050

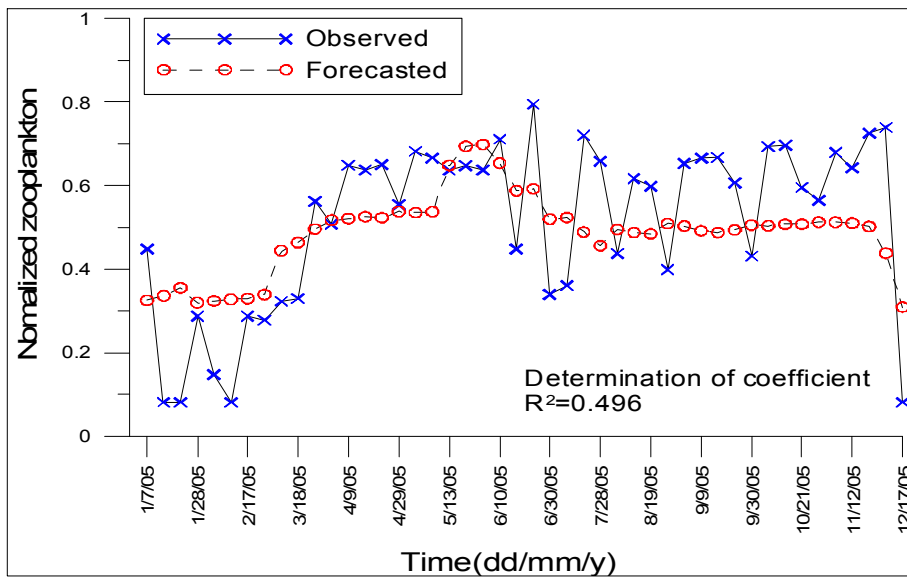


그림 4.3 학습 횟수 1,000을 사용한 예측

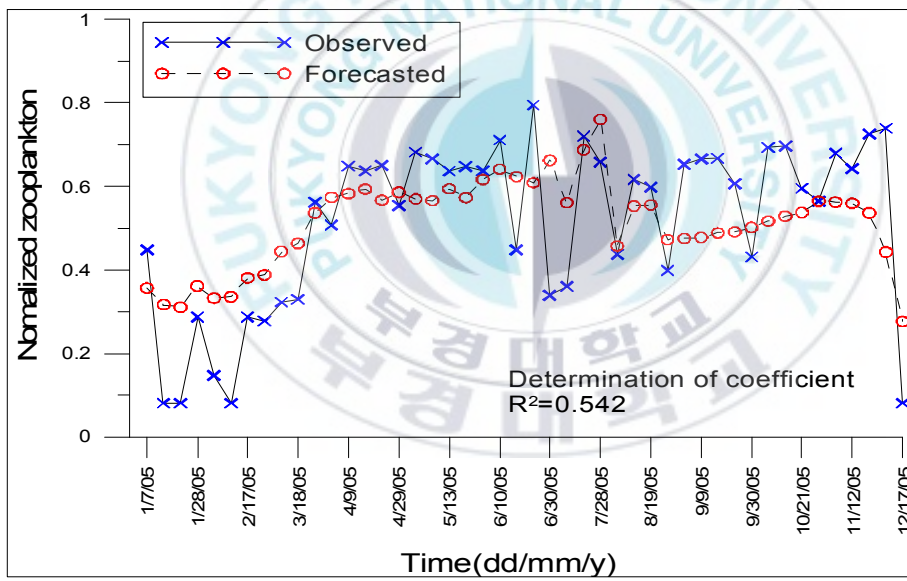


그림 4.4 학습 횟수 5,000을 사용한 예측

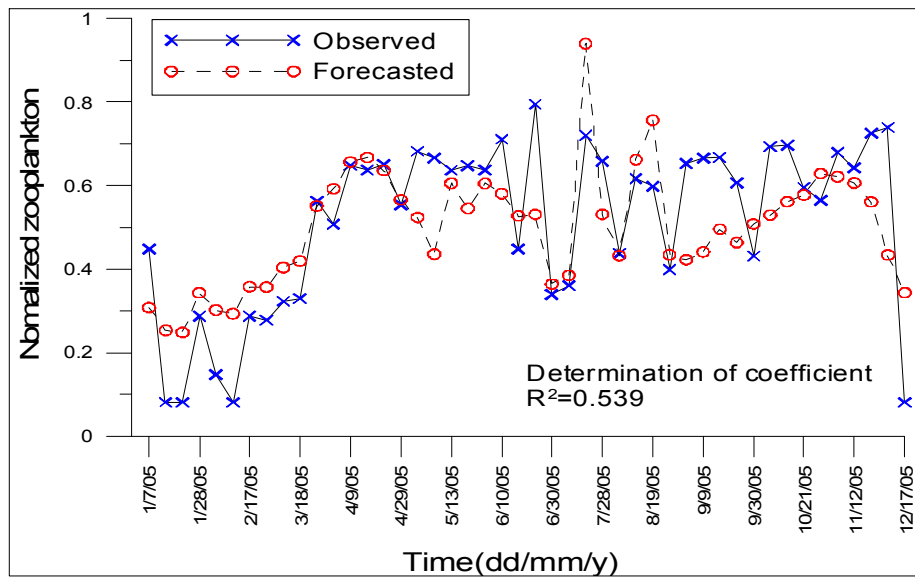


그림 4.5 학습 횟수 10,000을 사용한 예측



4.1.3 기온에 의한 동물성 플랑크톤 예측

수온은 간헐적인 자료로 일 단위 보다는 2주 또는 월 단위로 측정되는 경우가 많다. 기온의 경우는 기상청에서 관측하는 일 단위 자료를 구할 수 있기 때문에 기온에 의한 동물성 플랑크톤 개체수를 예측하였다. 그리고 수온과 기온에 의한 동물성 플랑크톤 개체수의 예측결과를 비교하였다. 기온과 수온에 의해 예측된 동물성 플랑크톤의 결과는 그림 4.6과 같으며, 예측된 결과의 통계량 분석은 표 4.3에서 나타내었다.

예측결과 5월에서 6월 사이는 기온에 의해 예측된 플랑크톤이 크게 예측되었고, 8월에서 9월 사이는 수온에 의한 예측결과보다 관측값에 더 가깝게 예측되었다.

통계량을 분석한 결과 RMSE는 두 경우 비슷하게 결정되었다. PBIAS는 수온에 의한 예측결과 관측값보다 작았고 기온에 의한 예측결과는 관측값보다 컸다. NSE는 수온에 의한 예측결과가 조금 컸다. PME는 기온에 의한 예측결과가 0보다 작은 -0.1991이었다.

표 4.3 기온과 수온에 의해 예측된 동물성 플랑크톤 통계량

통계량	기온에 의한 동물성 플랑크톤 예측	수온에 의한 동물성 플랑크톤 예측
RMSE	0.16	0.14
PBIAS	-5.27	3.01
NSE	0.379	0.534
PME	-1.991	0.050

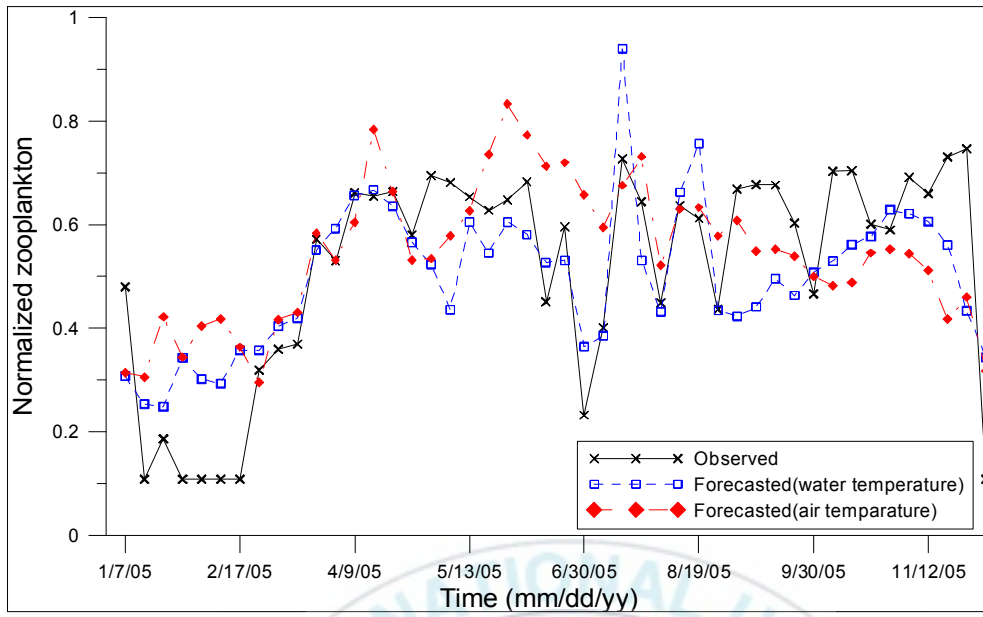


그림 4.6 기온과 수온에 의한 동물성 플랑크톤 예측결과

4.2 동물성 플랑크톤 예측에 의한 수질모의

예측된 동물성 플랑크톤을 입력하여 WASP 모형을 수행하였으며, 모의기간은 2005년 1월 25일부터 2005년 12월 31일까지이다. 모형의 모의는 Chl-a를 중심으로 하였으며, 모의간격과 출력간격을 1일로 하였다. 모의 결과는 그림 4.7~4.16으로 나타냈다. 시간에 따른 모의결과를 비교하기 위해 제공된 평균오차, 평균 편차의 비율, Nash-Sutcliffe 효율성 지수, 지속 모형 효율성 지수를 구하였다(표 4.4).

표 4.4 동물성 플랑크톤 예측에 의한 수질항목의 통계량

수질항목	RMSE	PBIAS	NSE	PME
Chl-a	73.86	-51.81	-0.471	-1.033
DO	1.38	-0.81	0.760	0.858
BOD	1.60	79.92	0.025	-2.555
NH ₄ -N	0.07	-43.86	0.473	0.407
NO ₃ -N	0.51	-5.36	0.478	0.813
Organic-N	0.41	159.83	-0.033	-10.402
Total-N	0.36	1.94	0.711	0.921
PO ₄ -P	0.02	-22.31	0.021	-1.060
Organic-P	0.02	74.07	0.126	-0.445
Total-P	0.02	0.10	-0.393	0.410

(1) Chl-a

Chl-a의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 4.7과 같다. RMSE는 73.86이고 PBIAS는 -51.81 %로 관측값보다 크게 모의되었다. NSE와 PME는 -0.471, -1.033으로 최소값인 0보다 작았다..

(2) DO

DO의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 4.8과 같다. RMSE는 1.38, PBIAS는 -0.81 %, NSE는 0.760, PME는 0.858로 모의값이 관측값에 비교적 가까웠다.



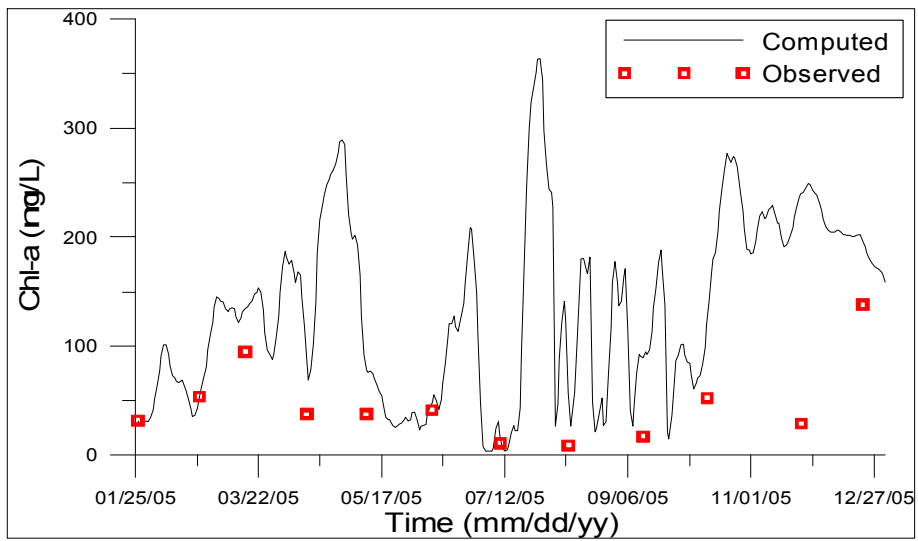


그림 4.7 물금의 Chl-a 관측값과 모의값 비교
(동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)

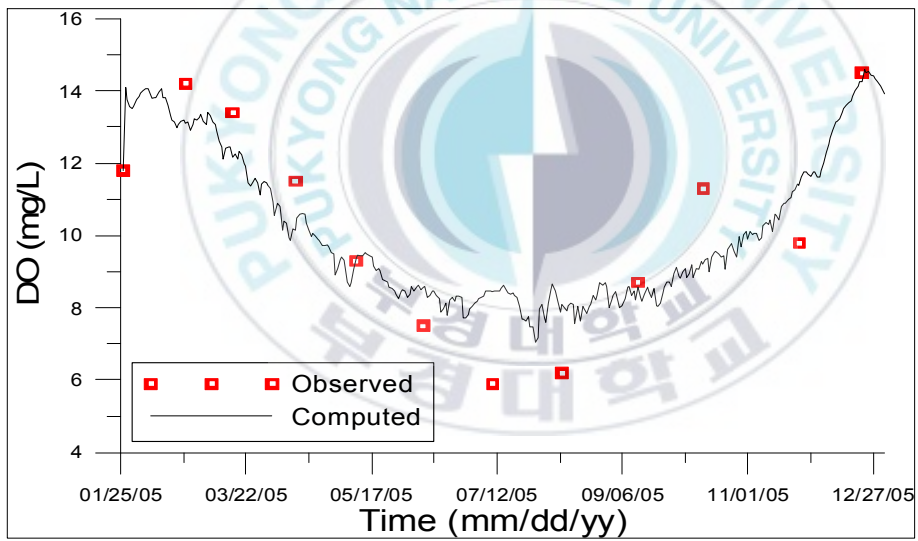


그림 4.8 물금의 DO 관측값과 모의값 비교
(동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)

(3) BOD

BOD의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 4.9와 같다. RMSE는 1.60이다. PBIAS는 79.91 %로 관측값보다 모의값이 작게 모의되었으며, NSE는 0.025이다. PME는 -2.555로 최소값과 크게 차이가 났다.

(4) $\text{NH}_4\text{-N}$

$\text{NH}_4\text{-N}$ 의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 4.10과 같다. PBIAS는 -43.86 %로 관측값보다 크게 모의되었고, RMSE는 0.07, NSE는 0.473, PME는 0.407로 적절하게 모의되었다. 전체적으로 관측값과 모의값의 상관성이 없어 보인다.



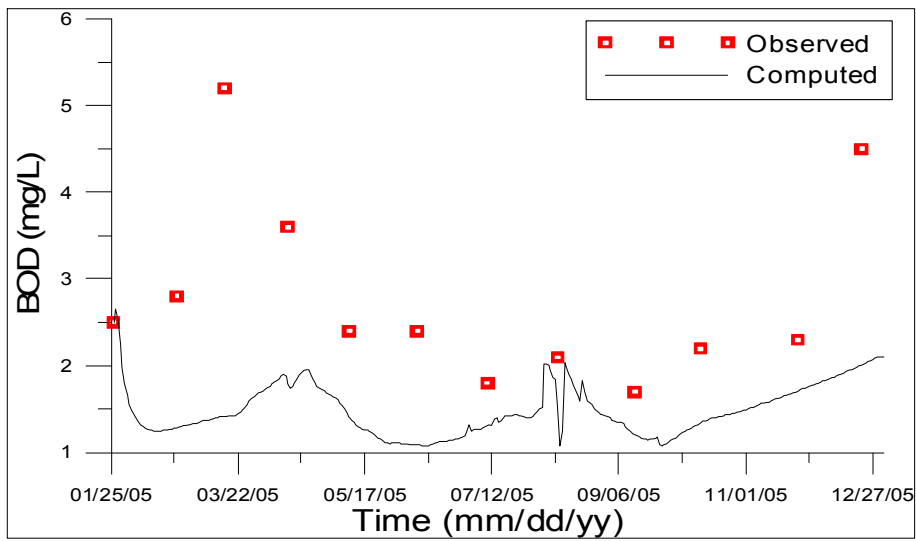


그림 4.9 물금의 BOD 관측값과 모의값 비교

(동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)

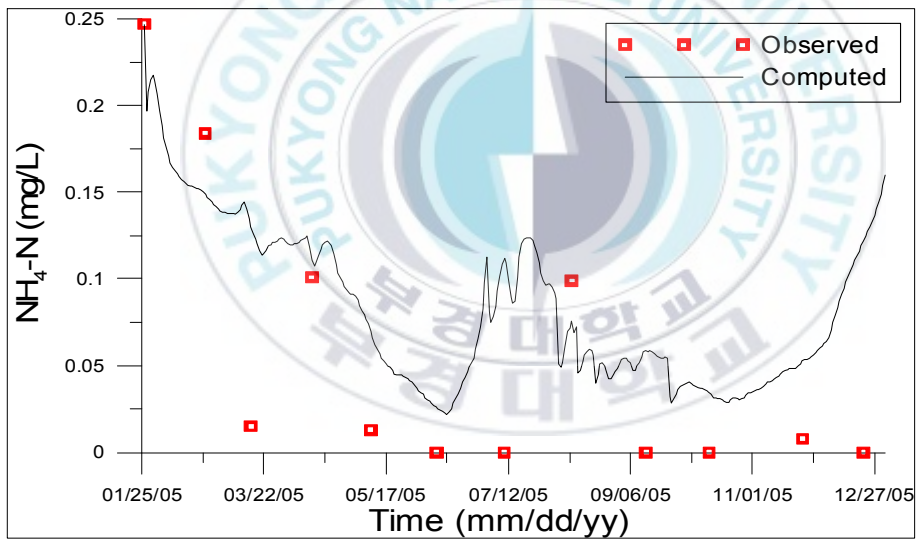


그림 4.10 물금의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 관측값과 모의값 비교

(동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)

(5) $\text{NO}_3\text{-N}$

$\text{NO}_3\text{-N}$ 의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 4.11과 같다. RMSE는 0.51, PBIAS는 -5.36 %, NSE는 0.478, PME는 0.813으로 8월의 모의값을 제외하고 관측값에 비교적 가까웠다.

(6) Organic-N

Organic-N의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 4.12와 같다. RMSE는 0.41이다. PBIAS는 159.83 %으로 관측값과 모의값이 큰 차이를 보이고 있으며, NSE와 PME는 -0.033, -10.402로 모두 음수를 나타낸다. 이것은 8, 11, 12월의 모의값이 관측값보다 훨씬 크게 모의되었기 때문이다. Organic-N의 모의는 적절하지 못한 것을 나타내고 있다.



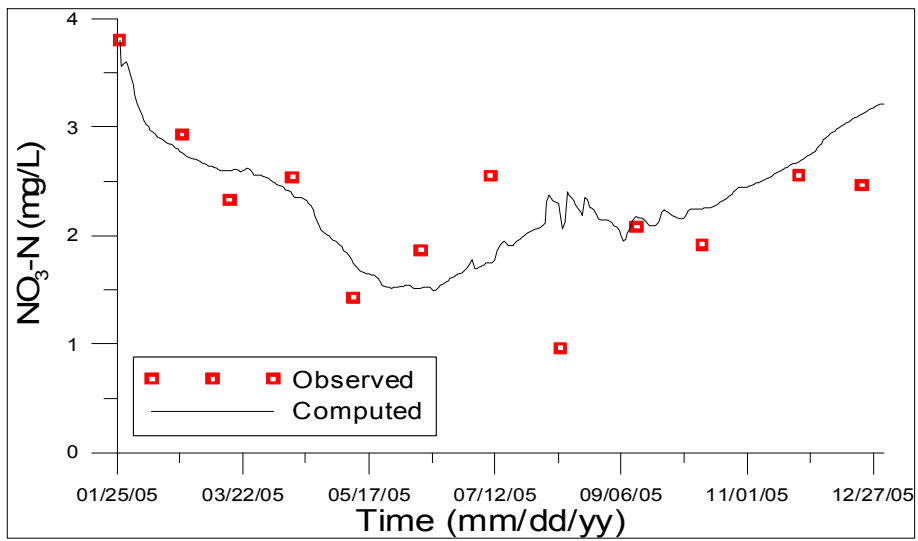


그림 4.11 물금의 NO₃-N 관측값과 모의값 비교
(동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)

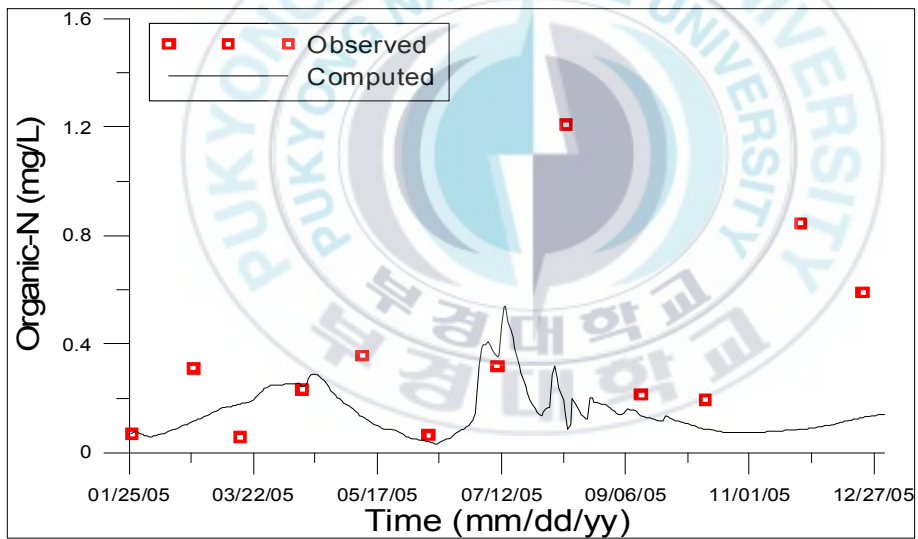


그림 4.12 물금의 Organic-N 관측값과 모의값 비교
(동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)

(7) Total-N

Total-N의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 4.13과 같다. RMSE는 0.36, PBIAS는 1.94 %, NSE는 0.711, PME는 0.921로 동물성 플랑크톤 예측에 의한 수질모의 항목 중 비교적 가장 정확하게 모의되었다.

(8) $\text{PO}_4\text{-P}$

$\text{PO}_4\text{-P}$ 의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 4.14와 같다. RMSE는 0.02로 최적값에 가깝게 모의되었다. PBIAS는 -22.31 %로 모의값이 관측값보다 컸으며, NSE와 PME는 0.021, -1.060이다. $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 모의는 적절하지 않다고 볼 수 있다.



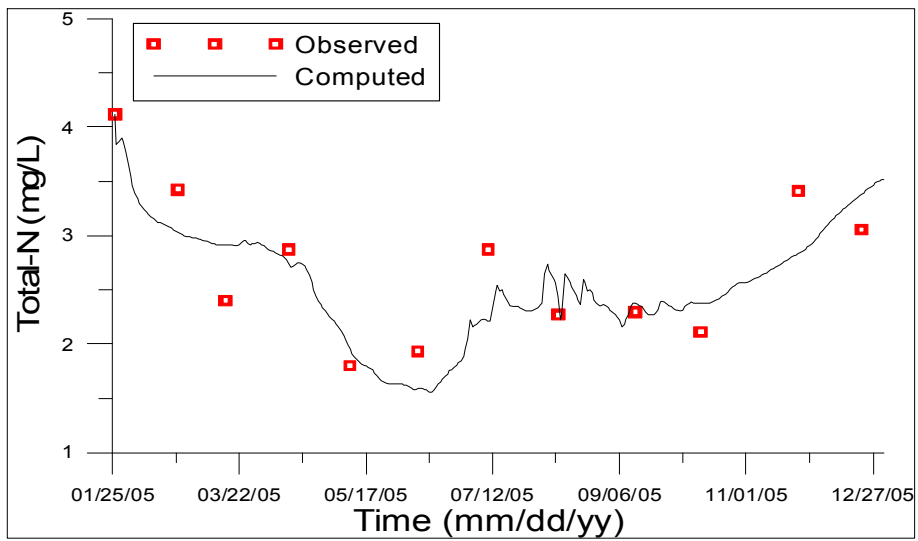


그림 4.13 물금의 Total-N 관측값과 모의값 비교
(동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)

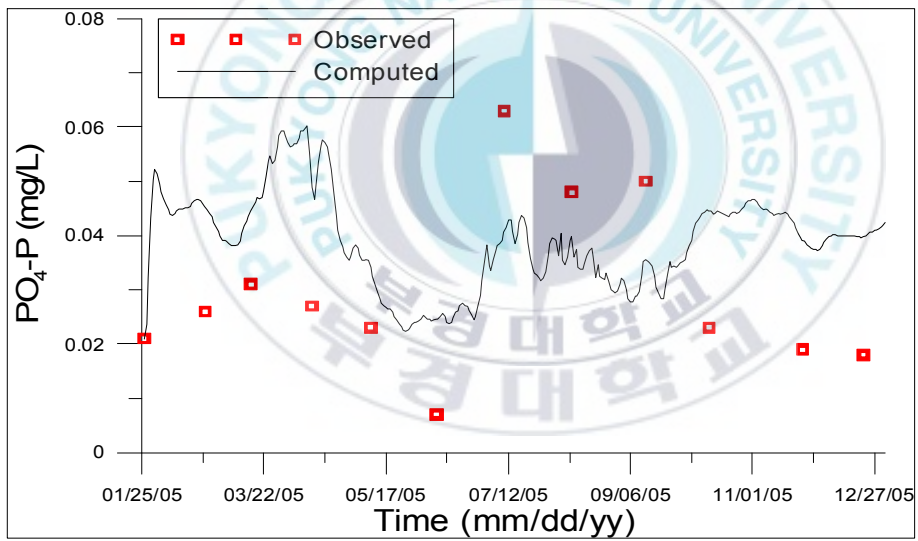


그림 4.14 물금의 PO₄-P 관측값과 모의값 비교
(동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)

(9) Organic-P

Organic-P의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 4.15와 같다. Organic-P의 경우도 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 경우와 같이 RMSE는 0.02로 최적값에 가깝지만, PBIAS, NSE, PME는 74.07, 0.126, -0.445로 최적값과는 차이가 크게 났다.

(10) Total-P

Total-P의 관측값과 모의값을 비교한 결과는 그림 4.16과 같다. RMSE는 0.02, PBIAS는 0.10, PME는 0.410으로 적절한 값을 나타내고 있다. 그러나 NSE는 -0.393으로 최소값보다 작다.



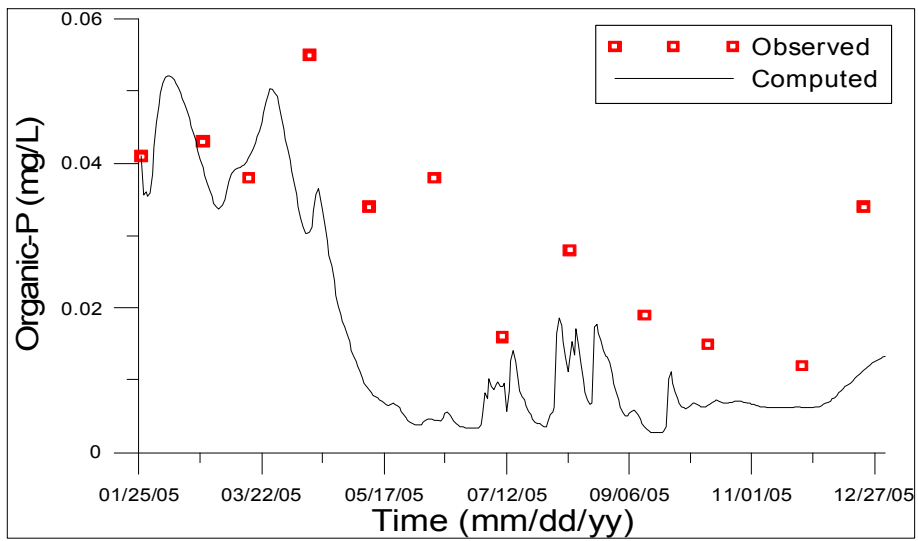


그림 4.15 물금의 Organic-P 관측값과 모의값 비교
(동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)

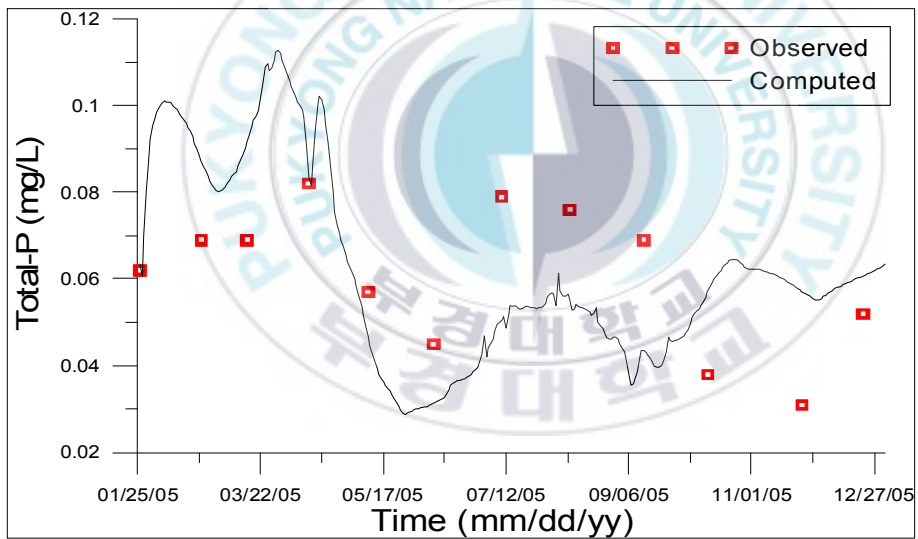


그림 4.16 물금의 Total-P 관측값과 모의값 비교
(동물성 플랑크톤 예측에 의한 모의)

4.3 예측된 동물성 플랑크톤 개체수, 관측된 동물성 플랑크톤 개체수와 식물성 플랑크톤 사멸률을 이용한 Chl-a의 비교

신경망에 의해 예측된 동물성 플랑크톤의 개체수를 입력하여 모의한 Chl-a가 식물성 플랑크톤 사멸률을 입력하여 모의한 Chl-a보다 적절하게 모의되었는지를 비교하였다. 그리고 관측된 동물성 플랑크톤의 개체수를 입력한 결과와도 비교를 하였다(그림 4.17).

예측된 동물성 플랑크톤 개체수를 입력하여 모의한 Chl-a 그래프의 경향은 식물성 플랑크톤의 사멸률을 입력하여 모의한 결과와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 이것은 7월과 8월, 10월과 11월 사이에 예측된 동물성 플랑크톤의 개체수가 관측된 동물성 플랑크톤의 개체수보다 훨씬 작게 예측되었기 때문이다. 표 4.5는 세 경우에 대한 모의결과를 분석한 결과이다. RMSE와 PBIAS의 적절성은 관측된 동물성 플랑크톤 개체수, 예측된 동물성 플랑크톤 개체수, 식물성 플랑크톤의 사멸률을 입력하여 모의한 결과 순이었다. NSE와 PME는 예측된 동물성 플랑크톤 개체수, 식물성 플랑크톤의 사멸률을 입력하여 모의한 결과 모두 음수를 나타내고 있다.

표 4.5 세 경우에 의해 모의된 Chl-a의 통계량

통계량	관측된 동물성 플랑크톤 개체수	예측된 동물성 플랑크톤 개체수	식물성 플랑크톤 사멸률
RMSE	25.53	73.86	101.38
PBIAS	6.52	-51.81	-61.11
NSE	0.482	-0.471	-0.580
PME	0.805	-1.033	-0.367

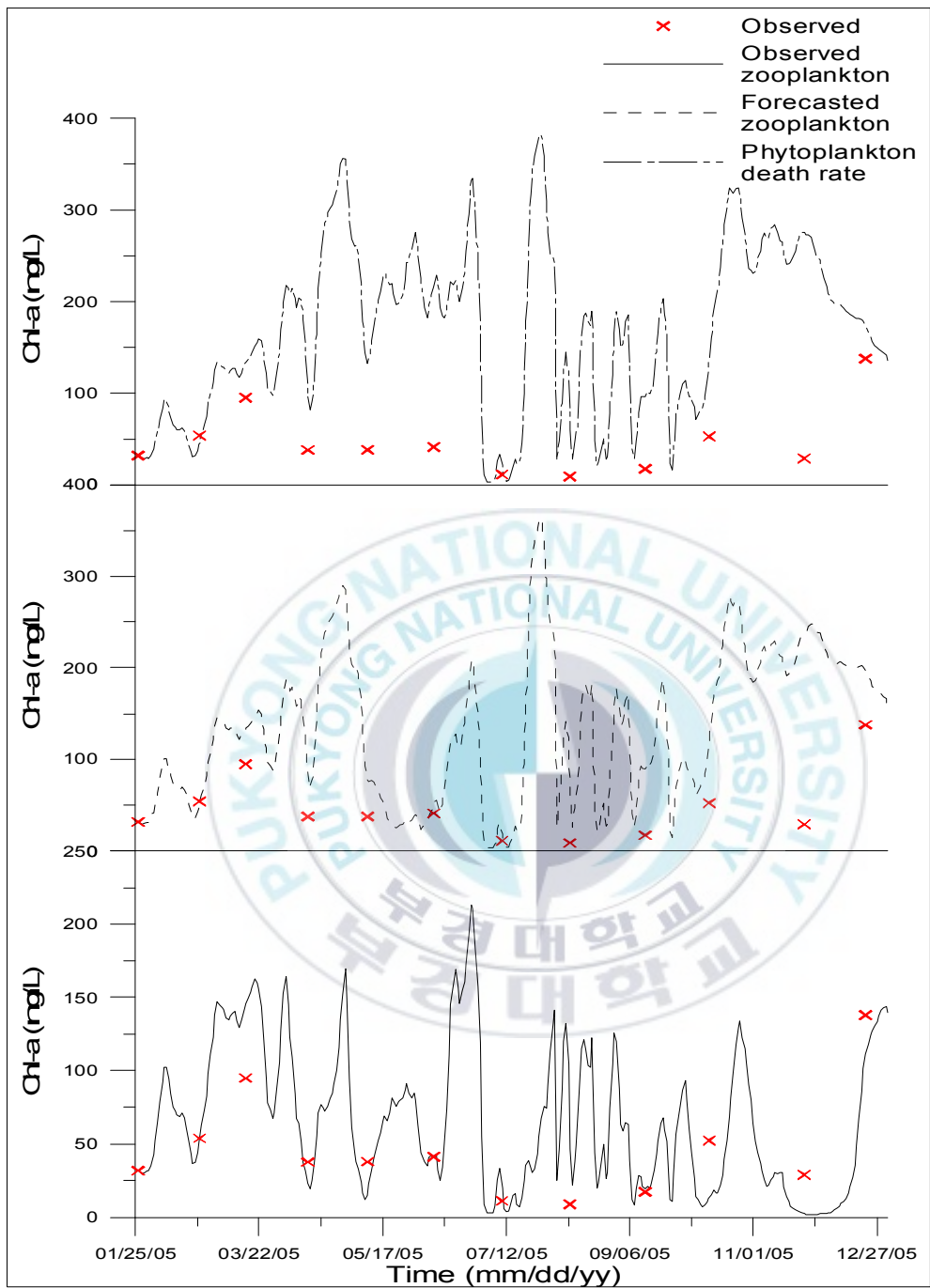


그림 4.17 세 경우에 의해 모의된 물금의 Chl-a 비교

5. 기온 변화에 따른 수질의 단기 예측

5.1 수질의 단기 예측 방법

WASP모형에서는 수온을 입력하여 수질을 모의한다. 그러나 수온의 경우 다른 시간함수로 입력되는 일사량, 일조율과 같이 일 단위의 자료가 제공되지 않고 간헐적인 자료를 측정하고 있다.

4장에서는 기온을 사용하여 WASP모형에 입력되는 동물성 플랑크톤 개체수를 예측한 후, 모의된 수질항목을 비교하였다.

수온은 일 단위의 예측 자료가 없지만, 기온의 경우 기상청에서 일주일 단위로 예측하고 있다. 그래서 기온 변화에 대한 수질의 단기 예측이 가능할 것으로 생각된다.

단기 예측은 관측값이 있는 2005년을 대상으로 하였다. 예측기간에 따라 수질이 어떻게 변화되는지 알아보기 위하여, 예측 간격은 1일, 3일, 7일로 하였다. 낙동강 조사월보의 수질 관측값을 초기조건으로 하여 예측 기간동안 고정시켰다. 그리고 관측된 DO, NO₃-N, PO₄-P, 기온에 의해 예측된 동물성 플랑크톤의 개체수를 입력하여, 기온 변화에 따라 1일, 3일, 7일 후의 수질항목이 어떻게 변하는지 모의하였다.

5.2 수질의 단기 예측 결과

(1) Chl-a

Chl-a의 단기 예측결과는 표 5.1, 그림 5.1과 같다. 1일 후의 예측은 관측값에 가깝게 모의되었다. 3일 후의 예측은 7, 8월의 Chl-a 농도가 크게 예측되었다. 7일 후의 예측은 Chl-a 농도가 전체적으로 크게 예측되었고, 월별 농도의 변화양상도 관측값과 다르게 예측되었다. 통계량 분석결과 1일과 3일 후의 예측은 관측값에 적합한 결과를 예측하였다. 7일 후의 예측은 관측값보다 44.24 % 크게 예측되었고, NSE는 -1.582로 최소값보다 작게 예측되어 Chl-a의 예측에 적합하지 않았다.

표 5.1 예측 간격에 따른 Chl-a의 통계량

예측 간격	RMSE	PBIAS	NSE	PME
1일	17.84	12.55	0.906	0.738
3일	38.12	-15.57	0.570	0.503
7일	93.40	-44.24	-1.582	0.131

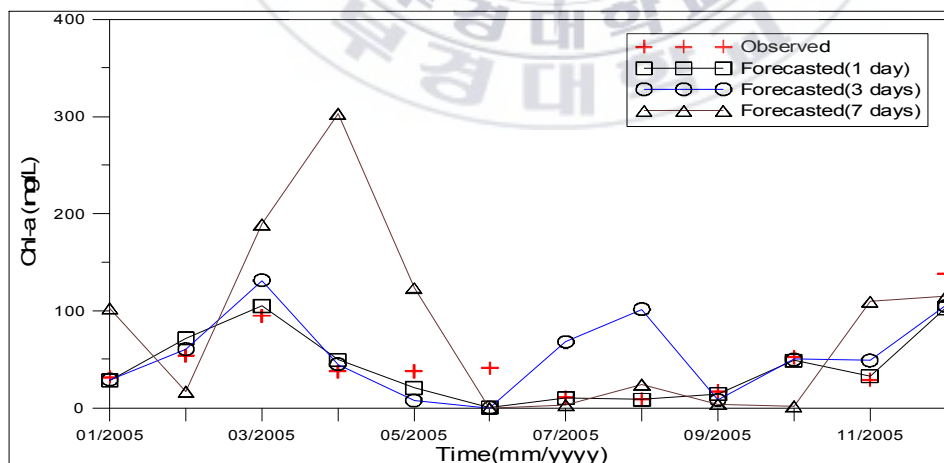


그림 5.1 물금의 Chl-a 관측값과 예측값 비교

(2) DO

DO의 단기 예측결과는 표 5.2, 그림 5.2와 같다. 1, 3, 7일 후의 예측결과 모두 7월과 8월의 예측결과 관측값보다 크게 예측되었다. 그리고 통계량 분석결과 PBIAS모두 5 % 정도 크게 예측되었다. 통계량분석의 RMSE, PBIAS 모두 최적값인 0에 가까웠고, NSE, PME는 최적값인 1에 가깝게 모의되었다. DO는 1, 3, 7일 후의 예측결과가 모두 적합하였고, 예측기간에 따른 차이가 거의 없었다.

표 5.2 예측 간격에 따른 DO의 통계량

예측 간격	RMSE	PBIAS	NSE	PME
1일	1.42	-5.40	0.982	0.877
3일	1.52	-5.65	0.980	0.861
7일	1.49	-5.49	0.981	0.869

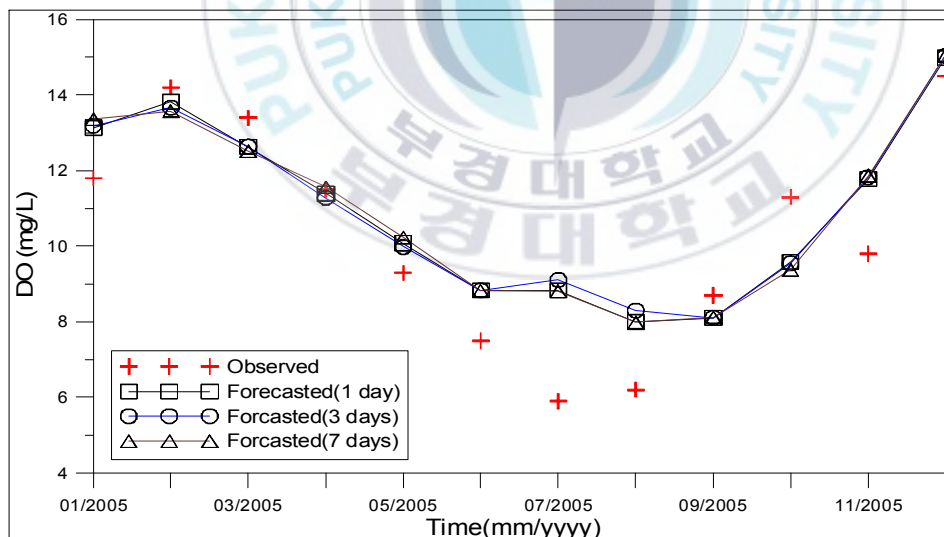


그림 5.2 물금의 DO 관측값과 예측값 비교

(3) BOD

BOD의 단기 예측결과는 표 5.3, 그림 5.3과 같다. 1일과 3일 후의 예측 결과는 관측값과 비슷하게 모의되었으며, 3일 예측결과는 1일 예측결과보다 10 % 정도 작게 예측되었다. 두 예측결과 적합한 결과를 나타내고 있다. 7일 후의 예측의 통계량 분석결과 RMSE는 1.08 NSE는 0.869로 최적값에 가깝지만 PBIAS는 44.32 % 작게 예측되었고 PME는 -0.962로 예측에는 적합하지 않은 결과를 나타내고 있다.

표 5.3 예측 간격에 따른 BOD의 통계량

예측 간격	RMSE	PBIAS	NSE	PME
1일	0.27	2.29	0.992	0.950
3일	0.44	13.14	0.979	0.840
7일	1.08	43.22	0.869	-0.962

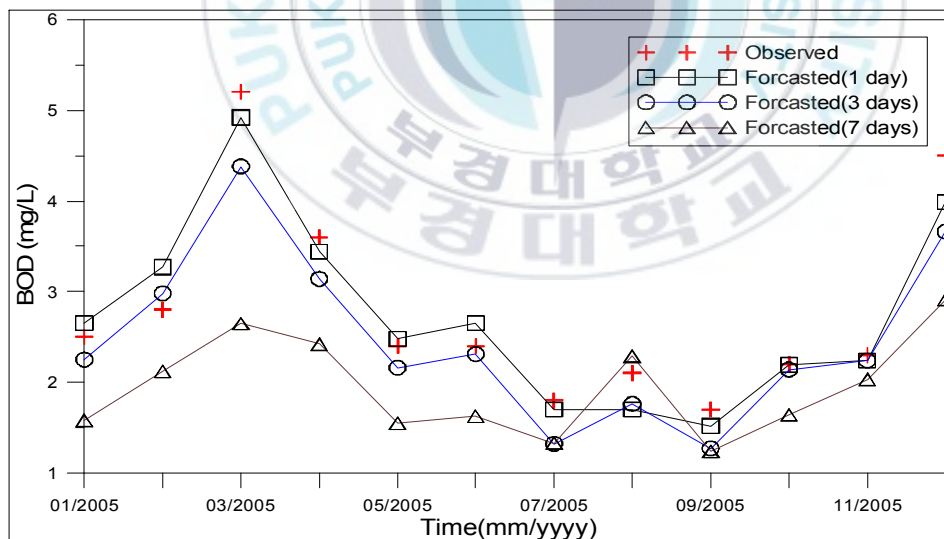


그림 5.3 물금의 BOD 관측값과 예측값 비교

(4) $\text{NH}_4\text{-N}$

$\text{NH}_4\text{-N}$ 의 단기 예측결과는 표 5.4, 그림 5.4와 같다. 1일 후의 예측결과는 관측값보다 17.55 % 크게 예측되었으며, RMSE는 0.03, NSE는 0.905, PME는 0.888로 적합한 예측결과를 나타내고 있다. 3일과 7일 후의 예측결과 RMSE는 최적값에 가깝지만 PBIAS는 45 % 이상 크게 예측되었다. PME는 모두 음수값으로 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 예측에는 적합하지 않았다.

표 5.4 예측 간격에 따른 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 통계량

예측 간격	RMSE	PBIAS	NSE	PME
1일	0.03	-17.55	0.905	0.888
3일	0.08	-47.89	0.373	-0.046
7일	0.09	-45.95	0.231	-0.455

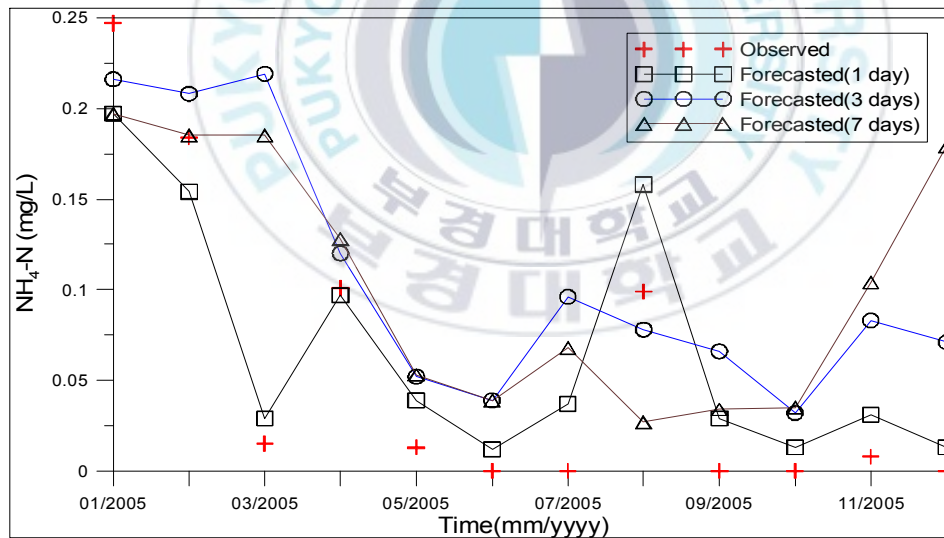


그림 5.4 물금의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 관측값과 예측값 비교

(5) $\text{NO}_3\text{-N}$

$\text{NO}_3\text{-N}$ 의 단기 예측결과는 표 5.5, 그림 5.5와 같다. 1, 3, 7일 후의 예측결과 8월의 예측결과는 모두 관측값보다 크게 예측되었기 때문에 PBIAS가 조금 크게 예측되었다. RMSE, NSE, PME의 결과는 최적값에 가까운 값을 나타낸다. 1, 3, 7일의 후의 예측은 모두 관측값에 가까운 결과를 나타낸다.

표 5.5 예측 간격에 따른 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 통계량

예측 간격	RMSE	PBIAS	NSE	PME
1일	0.29	-1.09	0.986	0.936
3일	0.48	-2.84	0.960	0.818
7일	0.57	-3.39	0.843	0.706

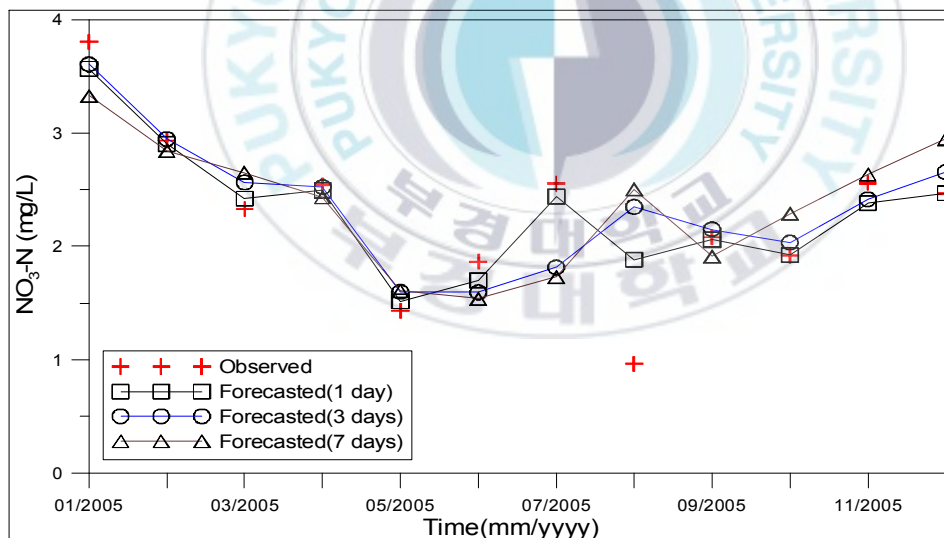


그림 5.5 물금의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 관측값과 예측값 비교

(6) Organic-N

Organic-N의 단기 예측결과는 표 5.6, 그림 5.6과 같다. 1일 후의 예측 결과는 관측값보다 17.55 % 크게 예측되었으며, RMSE는 0.03, NSE는 0.905, PME는 0.888로 적합한 예측결과를 나타내고 있다. 3일과 7일 후의 예측결과 RMSE는 최적값에 가깝지만 PBIAS는 45 % 이상 크게 예측되었다. PME는 모두 음수값으로 Organic-N의 예측에는 적합하지 않았다.

표 5.6 예측 간격에 따른 Organic-N의 통계량

예측 간격	RMSE	PBIAS	NSE	PME
1일	0.23	16.86	0.796	0.030
3일	0.31	29.01	0.625	-0.893
7일	0.33	56.84	0.566	-1.620

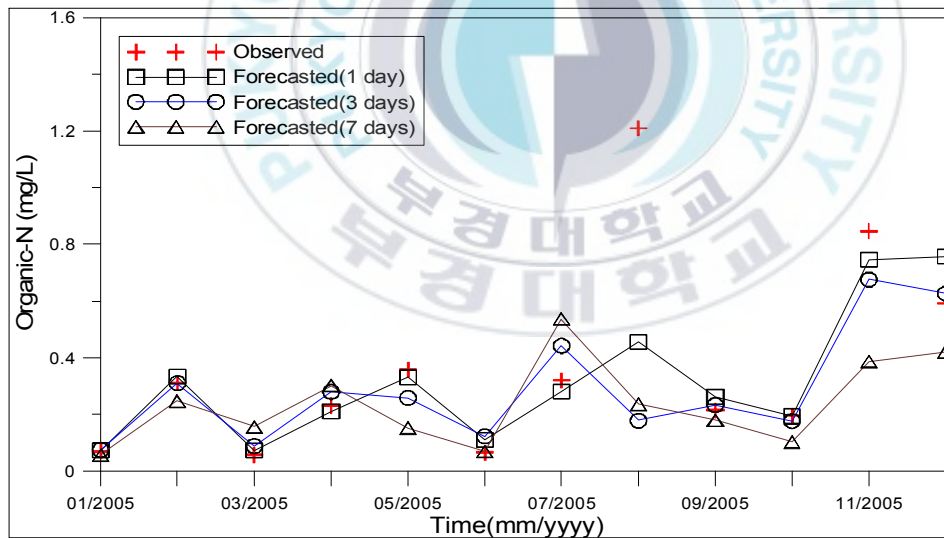


그림 5.6 물금의 Organic-N 관측값과 예측값 비교

(7) Total-N

Total-N의 단기 예측결과는 표 5.7, 그림 5.7와 같다. 1일, 3일, 7일 후의 예측결과는 모두 RMSE, PBAIS는 0에 가깝고, NSE, PME는 0.9 이상을 나타내고 있다. Total-N의 월별 변화양상은 1일 후의 예측결과는 관측값과 비슷하였고, 3일 후의 예측은 7일 후의 예측과 비슷하였다. 1, 3, 7일 후의 예측결과는 모두 관측값에 가까운 결과를 나타낸다.

표 5.7 예측 간격에 따른 Total-N의 통계량

예측 간격	RMSE	PBIAS	NSE	PME
1일	0.15	0.55	0.997	0.985
3일	0.27	-1.34	0.991	0.951
7일	0.38	0.14	0.982	0.892

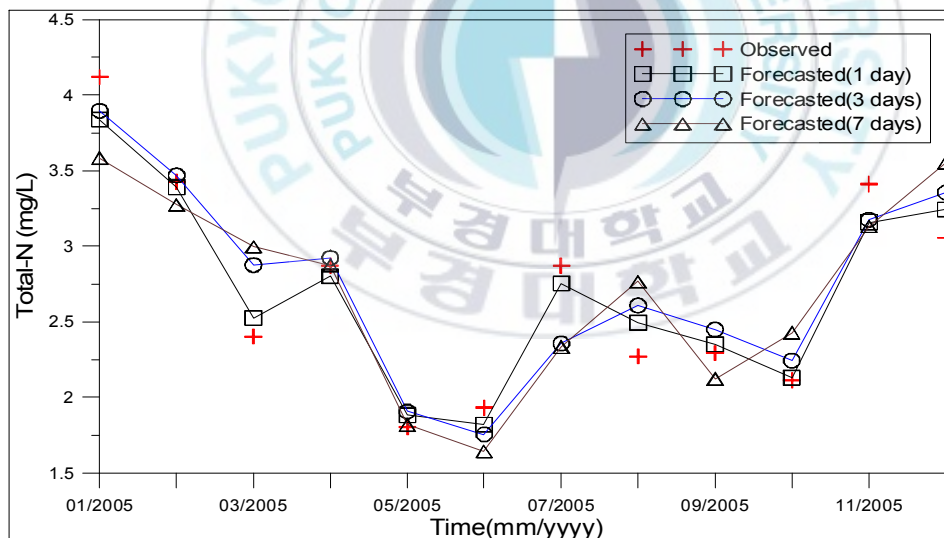


그림 5.7 물금의 Total-N 관측값과 예측값 비교

(8) $\text{PO}_4\text{-P}$

$\text{PO}_4\text{-P}$ 의 단기 예측결과는 표 5.8, 그림 5.8과 같다. 1일, 3일, 7일 후의 예측결과 모두 RMSE는 0.2로 같았고 PBIAS는 전체적으로 25 % 정도 크게 예측되었다. 1일과 3일 후의 예측결과 RMSE, PBIAS, NSE 모두 관측값에 가까운 결과를 나타내지만, 3일 후의 예측결과 PME는 최소값에 가까운 0.131이다. 7일 후의 예측결과 NSE는 1일, 3일 후의 예측결과보다 조금 작았으나 PME가 최소값보다 작은 -0.456이기 때문에 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 예측에는 적합하지 않았다.

표 5.8 예측 간격에 따른 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 통계량

예측 간격	RMSE	PBIAS	NSE	PME
1일	0.02	-23.80	0.732	0.560
3일	0.02	-30.13	0.729	0.131
7일	0.02	-25.65	0.537	-0.456

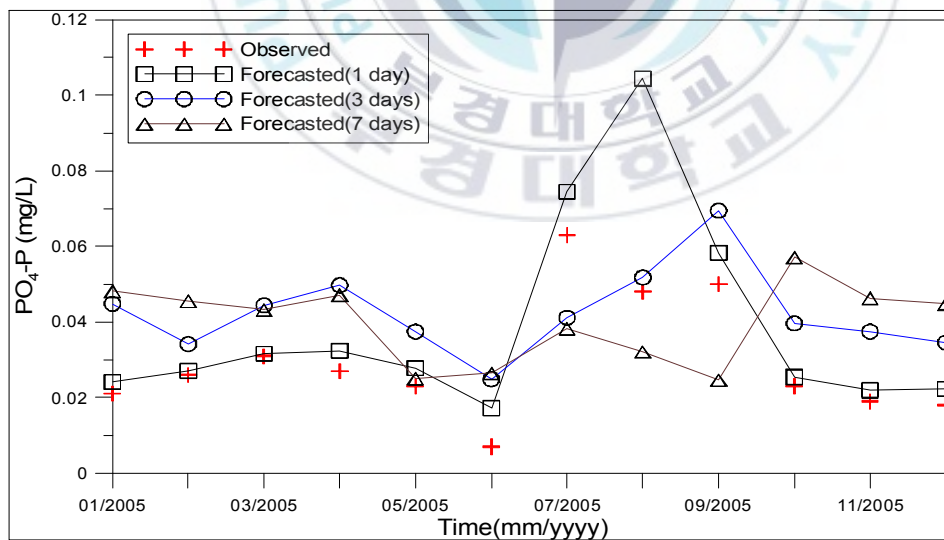


그림 5.8 물금의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 관측값과 예측값 비교

(9) Organic-P

Organic-P의 단기 예측결과는 표 5.9, 그림 5.9과 같다. 1일 후의 예측 결과는 관측값보다 17.51 % 작게 예측되었고, RMSE는 0.01, NSE는 0.964, PME는 0.736으로 예측에 가까운 결과를 나타내고 있다. 3일과 7일 후의 예측결과는 RMSE와 NSE는 가까운 결과를 나타내지만, PBIAS가 관측값보다 50 % 이상 작게 예측되었고, PME는 -0.230, 0.076으로 음수이거나 최소값인 0에 가까운 결과를 나타내고 있다.

표 5.9 예측 간격에 따른 Organic-P의 통계량

예측 간격	RMSE	PBIAS	NSE	PME
1일	0.01	17.51	0.964	0.736
3일	0.01	52.42	0.860	-0.230
7일	0.02	59.40	0.797	0.076

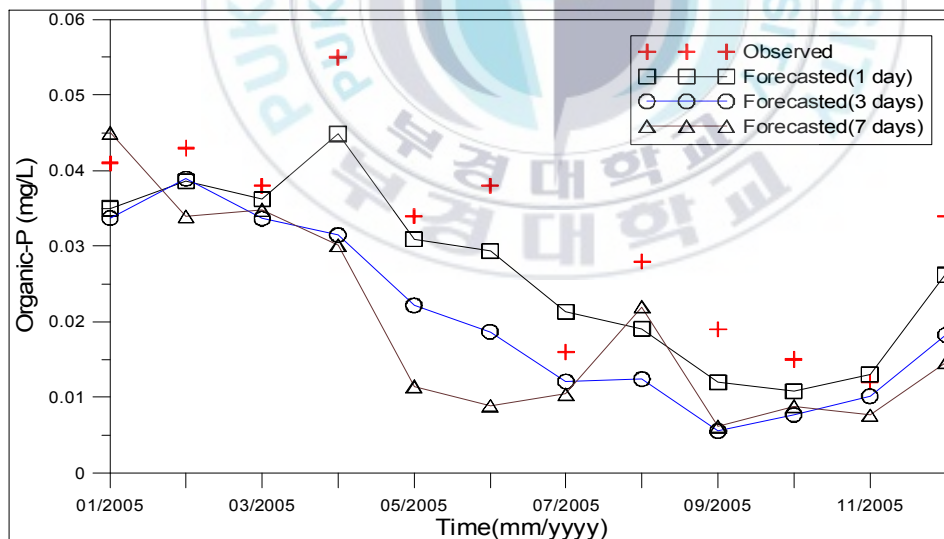


그림 5.9 물금의 Organic-P 관측값과 예측값 비교

(10) Total-P

Total-P의 단기 예측결과는 표 5.10, 그림 5.10과 같다. 1일 후의 예측은 6월부터 9월사이의 Total-P의 농도가 과대 추정되었다. 1일, 3일, 7일 후의 예측의 통계량 분석결과 모두 관측값에 가깝게 예측되었다. 7일 후의 예측결과 PME는 1일과 3일 예측결과에 비해 작게 추정되었다.

표 5.10 예측 간격에 따른 Total-P의 통계량

예측 간격	RMSE	PBIAS	NSE	PME
1일	0.01	-9.83	0.944	0.773
3일	0.01	-7.25	0.963	0.792
7일	0.02	-4.20	0.858	0.542

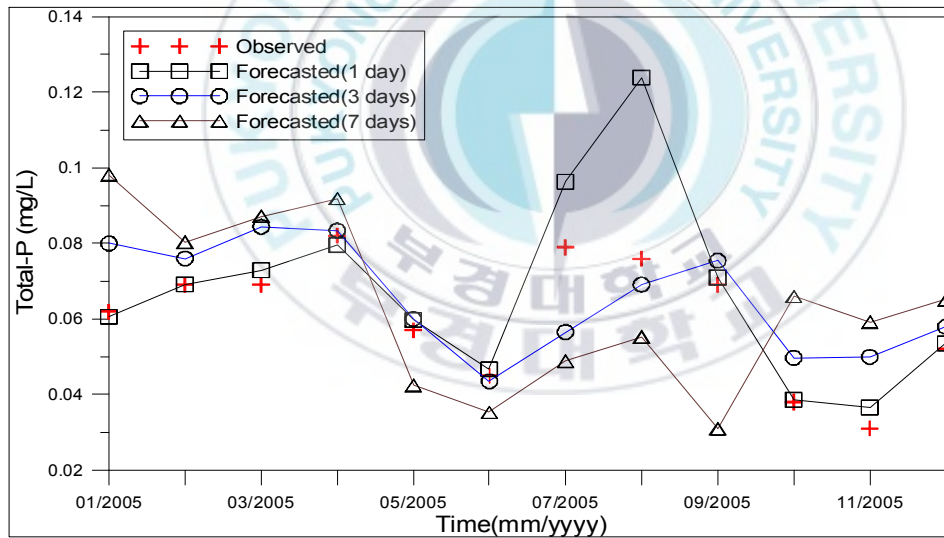


그림 5.10 물금의 Total-P 관측값과 예측값 비교

6. 결론 및 향후 과제

본 연구는 WASP모형을 이용하여 낙동강 유역의 하류 지역인 물금의 부영양화를 모의하고 예측하는 것이다. 부영양화 모의에는 관측된 동물성 플랑크톤 개체수를 사용하며, 동물성 플랑크톤 개체수를 입력한 결과와 과거의 수질 측정결과를 비교하였다. 그리고 신경망모형을 이용하여 미래의 동물성 플랑크톤 개체수를 예측한 후 WASP모형을 이용하여 단기 수질을 예측하였다. 수질 예측에 사용된 입력 자료는 수온을 대신하여 기온을 사용하였다. 그리고 모의결과와 예측결과를 통계량으로 분석하여 비교하였다.

WASP모형의 보정기간인 2003년의 수질 모의결과 10개의 수질항목 중 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, Organic-P는 관측값과 모의값을 비교했을 때 서로 가깝지 않았다. 모형의 검증기간인 2004~2005년의 수질모의 결과 BOD, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, Organic-P의 모의가 적절하지 않았다. 한편, 보정기간과 검증기간 모두 Chl-a, DO, $\text{NO}_3\text{-N}$, Organic-N, Total-N, Total-P의 항목이 적절히 모사되었다.

모의 결과를 비교하기 위해 제공된 RMSE, PBIAS, NSE, PME를 분석한 결과 결정계수가 크게 추정되어도 RMSE, PBIAS, NSE, PME가 모두 크게 추정되지는 않았다.

보통 WASP 모의에 사용되는 Chl-a의 사멸률 대신 동물성 플랑크톤 개체수를 입력한 결과 모형의 보정기간에서는 동물성 플랑크톤 개체수를 사용한 결과와 Chl-a의 사멸률을 사용한 결과가 비슷하게 모의되었지만, 통계량 분석결과 PBIAS는 Chl-a의 사멸률을 사용한 것이 50 % 이상 크게 모의되었다. PME의 경우 -1.397로 최소값인 0보다 작으므로 모의가 적절하지 않았다. 이 결과 동물성 플랑크톤의 개체수를 사용하여 모의하는 것이 Chl-a의 사멸률을 사용하는 것보다 관측값에 더 정확히 모의되

는 것으로 나타났다.

WASP모형의 모의에서 입력된 동물성 플랑크톤 개체수는 측정을 하기 어렵고, 수질항목에서 빠져 있으므로 자료를 구하기가 어렵다. 그래서 신경망모형 중 다층퍼셉트론(multi-layer perceptron)을 이용하여 동물성 플랑크톤 개체수를 예측하였다.

예측된 동물성 플랑크톤 개체수를 입력하여 2005년의 수질을 모의하였다. 예측된 동물성 플랑크톤 개체수를 입력하여 모의한 Chl-a의 모의결과는 관측된 동물성 플랑크톤 개체수를 입력하여 모의한 Chl-a의 모의결과보다 50 % 정도 크게 추정되었다. 동물성 플랑크톤 개체수의 예측과정에서 7월과 8월에 예측된 플랑크톤의 개체수가 과소 추정되었기 때문에 Chl-a의 농도가 과대 추정되었다. 반면에, 예측된 동물성 플랑크톤 개체수를 입력하여 모의한 Chl-a의 모의결과는 Chl-a의 사멸률을 입력한 모의결과보다 관측값에 가깝게 추정되었다.

수질을 단기 예측하기 위해 수온을 대신하여 기상청의 기온을 입력하여 수질을 예측하였다. 예측 간격을 1일, 3일, 7일로 수질항목을 예측하여 관측값과 예측값을 비교하였다. 1일 후의 예측결과는 관측값에 가깝게 모의되었지만, 3일과 7일 후의 예측결과는 1일 후의 예측결과보다 정확도가 떨어졌다. 7일 후의 예측결과 BOD, $\text{NH}_4\text{-N}$, Organic-N, $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 수질항목은 관측값과 비교했을 때 오차가 컸다. 그러나 부영양화에서 수질항목의 기준으로 사용되는 Chl-a, Total-N, Total-P는 예측 결과 관측값에 가깝게 모의되는 것으로 추정되었다.

신경망을 이용한 동물성 플랑크톤의 개체수를 예측하는 과정에서 학습자료의 부족으로 인해 수온, DO, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 를 사용하였다. 민감도 분석결과 Chl-a는 유량에 대해서 민감하게 반응하였다. 유량 자료를 포함하여 동물성 플랑크톤 개체수를 예측하는 것이 관측값에 더 가깝게 추정될 것으로 판단된다.

수질의 단기 예측에서, WASP모형에 입력되는 수온을 입력하지 않고 관측된 기온을 입력하였다. 동물성 플랑크톤은 관측된 DO, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, 기온을 사용하여 예측하였다. 그리고 2005년의 월별 관측값을 초기값으로 고정하여 단기 수질을 예측한 후 관측값과 예측값을 비교하였다. 그 결과 WASP에 입력되는 수질 항목의 관측값, 예측된 동물성 플랑크톤의 개체수와 기상청에서 예보되는 기온을 사용한 수질모의는 낙동강의 수질예측에 유의한 의미가 있을 것으로 사료된다.



참 고 문 헌

- 강신욱, 이상호 (2007). “다단계 자동보정 기법에 의한 NWS-PC 모형 매개변수의 추정.” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제27권, 제3호, pp. 211-218.
- 건설교통부 (2003). 한국수문조사연보.
- 건설교통부 (2004). 한국수문조사연보.
- 건설교통부 (2005). 한국수문조사연보.
- 기상청 (2003). 기상월보.
- 기상청 (2004). 기상월보.
- 기상청 (2005). 기상월보.
- 김만식, 한재석 (1999). “하천 수계의 장기 수질예측을 위한 신경망모형.” 환경관리학회지, 한국환경관리학회, 제5권, 제1호, pp. 142-152.
- 김만식, 이요상, 심규철, 심순보 (2001). “신경망모형을 이용한 하천의 수질예측 연구.” 한국수자원학회 학술발표회논문집(II), 한국수자원학회, pp. 925-930.
- 김미숙 (2002). 낙동강 수계의 부영양화에 미치는 환경요인들의 조사 및 통계학적 분석, 석사학위논문, 경상대학교.
- 김미숙, 정영륜, 서의훈, 송원섭 (2002). “낙동강 부영양화와 수질환경요인의 통계적 분석.” 한국조류학회학회지, 한국조류학회, 제17권, 제2호, pp. 105-115.
- 김대수 (2005). 신경망 이론과 응용(I), 진한엠엔비.
- 김연국, 김만식, 심규철, 심순보 (2000). “유전자 알고리즘을 이용한 WASP5/EUTRO5 모형의 매개변수추정.” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제20권, 제7호, pp. 559-562.
- 김주환 (1993). 신경회로망을 이용한 하천유출량의 수문학적 예측에 관한

- 연구, 박사학위논문, 인하대학교.
- 부산광역시 (2003). 낙동강 조사월보.
- 부산광역시 (2004). 낙동강 조사월보.
- 부산광역시 (2005). 낙동강 조사월보.
- 서동일, 이정우 (2005). “WASP7.0을 위한 3차원 수리 모델, EFDC-Hydro (Environmental Fluid Dynamics Code)의 활용에 관한연구.” 대한환경 공학회 2005 춘계학술연구발표회 논문집, 대한환경공학회, pp. 431-436.
- 성기준 (1993). 하천 수질모형의 비교분석에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교.
- 신성교, 이수웅, 박청길 (1996). “낙동강에서 Chlorophyll-a와 BOD의 상관관계.” 한국수질보전학회지, 한국수질보전학회, 제12권, 제4호, pp. 369-375.
- 신동석, 김영란, 이연희, 이상호, 김갑수, 유명진 (1993). “안양천 수질에 대한 WASP5 모형의 적용성 검토.” 환경종합 학술대회, 대한환경공학회, pp. 243-235.
- 신현석, 최시중, 김중훈 (1998). “신경망을 이용한 도시유역 유출 및 비점원 오염물 배출 모형화 연구.” 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제18권, 제5-B호.
- 오남선, 선우중호 (1996). “신경망이론에 의한 강우예측에 관한 연구.” 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제29권, 제4호, pp. 109-118.
- 이상희 (1999). 낙동강 수계의 부영양화가 식물성 플랑크톤의 분포에 미치는 영향, 석사학위논문, 창원대학교.
- 이순탁, 김성원 (1997). “홍수유출량 예측을 위한 인공신경망모델의 적용에 관한 연구.” 영남대학교 환경문제연구소 환경연구, 제16권, 제2호.
- 이종남, 정종문 (1997). “낙동강하류의 수계환경과 부영양화에 관한 연구.” 한국해양대학교 교양논총, 제5권, pp. 83-97.

- 정건희 (2001). 신경망모형을 이용한 대청댐의 수질예측에 관한 연구, 석사학위논문, 고려대학교.
- 정지현 (2003). 홍수기 댐 운영의 최적화에 관한 연구, 석사학위논문, 전남대학교.
- 조홍연, 전경수, 이길성, 한광석 (1993). “WASP4 모형의 매개변수추정-팔당호를 중심으로.” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제13권, 제4호, pp. 177-188.
- 주기재, 김현우, 하경 (1997). “하천 생태학의 발전과 우리 나라 하천 연구의 현황.” 한국생태학회지, 한국생태학회, 제20권, 제1호, pp. 69-78.
- 한건연, 백창현 (2004). “GIS를 이용한 저수지의 수질관리시스템 구축.” 한국GIS학회지, 한국GIS학회, 제12권, 제1호, pp. 13-27.
- 한국수자원공사 (2001). 수자원분석시스템 구축기법에 관한 연구 보고서.
- 한국수자원학회 (1999). 제7회 수공학웍샵 교재.
- 황병기 (1997). “수질모델 EUTRO5를 이용한 확산계수 산정법에 관한 연구.” 한국수질보전학회지, 한국수질보전학회, 제13권, 제3호, pp. 275-282.
- Ambrose, R.B., Barnwell, T.O., McCutcheon S.C., and Williams. R.T. (1996). “Computer Models for Water Quality Analysis.” Water Resources Handbook, McGraw Hill, New York.
- Ambrose, R.B., Martin, J.L., and Comer, E.A. (2004). *Water Quility Analysis Simulation Program WASP 6.0*. US EPA.
- Bowie, G.L., Mills, W.B., Porcella, D.B., Campbell, C.L., Pagenkopf, J.R., Rupp, G.L., Johnson, K.M., Chan, P.W.H., and Gherini, S.A. (1985). *Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling(2nd Ed.)*. US EPA.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S., and Yapo, P.O. (1999). “Status of

- automatic calibration for hydrologic model: Comparison with multilevel expert calibration.” *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 4, No. 2, pp. 135-143.
- Ha, K., Cho, E.A., Kim, H.W., and Joo, G.J. (1999). “Microcystis bloom formation in the lower Nakdong River in South Korea: Importance of hydro dynamics and nutrient loading.” *Marine and Freshwater Research*, Vol 50, pp. 89-94.
- Hebb, D.O. (1949). *The Organization of Behavior*. Wiley, New York.
- Hernandez, P., Ambrose, R.B. Jr, Prats, D., Ferrandis, E., and Asensi, J.C. (1997). “Modeling eutrophication kinetics in reservoir microcosms.” *Water Reserch*, Vol. 31, No. 10, pp. 2511-2519.
- Jeffris, M., and Mills, D. (1990). *Freshwater Ecology. Principles and Applications*. Belhaven Press, London.
- Jin, K.R., James, R.T., Lung, W.S., and Loucks, D.P. (1998). “Assessing Lake Okeechobee eutrophication with water-quality models.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol 124, No. 1, pp. 22-30.
- Karunanithi, N., Grenney, W.J., Whitley, D., and Bovee, K. (1994). “Neural Networks for River Flow Prediction.” *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol 121, No. 2, pp. 201-220.
- Kim, H.W., Hwang, S.J. and Joo, G.J. (2000). “Zooplankton grazing on bacteria and phytoplankton in a regulated large river (Nakdong River, Korea).” *Journal of Plankton Research*, Vol. 22, No. 8, pp. 1559-1577.
- Liong, S.Y., Ibrahim, Y., Chan, W.T., and Law, C.L. (1993). “Computer aided catchment calibration model.” *Advances in*

- Engineering Software*, Vol 17, No. 3, pp. 147-154.
- Luk, K.C., Ball, J.E., and Sharma, A. (2000). "A study of optimal model lag and spatial inputs to artificial neural network for rainfall forecasting." *Journal of Hydrology*, Vol 227, pp 56-65.
- Lung, W.S., and Larson, C.E. (1995). "Water quality modeling of upper Mississippi River and Lake Pepin." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 121, No. 10, pp.691-699
- McCulloch, W.S., and Pitts, W.H. (1947). "The perceptron of auditory and visual forms." *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol 9, pp. 127-147.
- Minsky, M., and Papert, S. (1969). *Perceptrons*, MIT Press.
- Nouh, M. (1996). "Simulation of Water Quality in Sewer Flood by Neural Networks." *Hydroinformatics '96, Proceedings of the 2nd International Conference on Hydro-informatics*, Zurich, Switzerland.
- Rumelhart, D.E., McClelland, J.L., and the PDP Research Group. (1986). *Parallel Distributed Processing*, Vol I,II, MIT Press.
- Smith, J., and Eli, R.N. (1995). "Neural-Network Models of Rainfall-Runoff Process." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol 121, Issue 6, pp. 499-508.
- Wang, P.F., Martin, J., and Morrison, G. (1999). "Water Quality and Eutrophication in Tampa Bay, Florida, Estuarine." *Coastal and Shelf Science*, Vol 49, pp. 1-20.
- Yabunaka, K.I., Hosomi, M., and Murakami, A. (1997). "Novel Application of Back-propagation Artificial Neural Network Model Formulated to Predict Algal Bloom." *Water Science and Technology*, Vol 36, pp. 89-97.

감사의 글

학부 때 수자원시스템 연구실에 처음 왔을 때가 생각납니다. 벌써 논문을 마무리 하고 졸업을 앞두고 있는 것을 보면 시간이 참 빨리 지나간 것 같습니다. 연구실 생활을 하면서 소중한 사람들을 많이 만나게 되었습니다. 그동안 부족한 저를 이끌어 주시고 많은 가르침을 주셨던 여러분들께 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

먼저 지도교수님이신 이상호 교수님께 감사드립니다. 처음 연구실 생활 할 때부터 논문을 끝낼 때까지 항상 자세히 지도해 주셨습니다. 그리고 성경공부를 하면서 평소 생각하지 않았던 것들을 다시 생각할 수 있게 해 주셨습니다. 항상 노력하는 제자가 되도록 하겠습니다.

그리고 논문을 지도해주신 손인식 교수님과 이종섭 교수님께도 감사드립니다.

연구실 선배로서 후배인 저에게 논문을 쓰면서 힘들어하고 학교생활에도 많은 도움을 주신 이정민 박사님, 강신욱, 박종표, 박복성 선배님, 강태욱, 조희호에게도 감사드립니다. 연구실 생활을 같이 하면서 많은 도움이 된 후배 이동엽, 정태훈에게도 고마운 마음을 전하며 대학원 생활 열심히 하면서 좋은 결과가 있기를 바랍니다.

지금도 1공학관에서 연구하고 계시는 모든 교수님들과 대학원생들께도 감사드립니다.

마지막으로 항상 부족한 아들이지만 언제나 믿어주시고 매일 기도하시는 아버지와 어머니께 감사드립니다. 그리고 공부한다는 이유로 찾아뵙지도 못했는데 이해해주시는 친가, 외가 어른들께도 고마운 마음을 전하고 싶습니다.

앞으로 이 논문을 계기로 더 노력하도록 하겠습니다.