

동물플랑크톤 군집자료를 이용한 낙동강 물금지점의 수질모의

이상호[†] · 최정민* · 정광석**

부경대학교 건설공학부

*한국토지주택공사 토지주택연구원

**부산대학교 생물학과

Water Quality Simulation at Mulgeum of the Nakdong River using Zooplankton Community Data

Sangho Lee[†] · Jung-Min Choi* · Kwang-Seuk Jeong**

Division of Civil Engineering, Pukyong National University

*Korea Land & Housing Corporation, Land & Housing Institute

**Department of Biology, Pusan National University

(Received 11 February 2009, Revised 20 October 2009, Accepted 21 October 2009)

Abstract

Since construction of the estuarine barrage at the mouth of the Nakdong River, eutrophication and increased abundance of phytoplankton have occurred mainly due to the increased retention time in the reach. However, during the spring, there is a decrease in chlorophyll-a, as a result of an increase in zooplankton number, which preys upon phytoplankton and affects the value of chlorophyll-a. In order to emphasize the importance of zooplankton data in water quality simulation, zooplankton community data were used to simulate water quality and eutrophication at Mulgeum located in 27 km upstream from the barrage. WASP 7.2 was used as the water quality model for the river, using a monthly data set from 2003 to 2005 for model calibration and verification. The results showed that chlorophyll-a, DO, and total nitrogen in the river were simulated well during the verification period. The results of water quality simulation using zooplankton community data in the model were better than those with phytoplankton death rate, in terms of the absolute value of percent bias, root mean square error, and Nash-Sutcliffe efficiency. Those results indicate the use of zooplankton data provides more accurate simulation results for chlorophyll-a and eutrophication.

keywords : Chlorophyll-a, Eutrophication, Mulgeum, WASP 7.2, Zooplankton

1. 서론

낙동강 하류 지역은 1990년대 중반과 후반의 7~8년 간 갈수기 식물플랑크톤 군집의 대거 번성으로 인한 부영양화로 연중 심각한 수질 오염문제가 야기되어 왔다. 특히, 1년 중 6개월 이상 *Microcystis*와 *Stephanodiscus*로 대표되는 식물플랑크톤의 수화현상(water bloom)이 관찰되어 낙동강 하류 지역에 있는 물금지점, 매리 등의 취수장이 정수과정에 어려움을 겪었다. 수화현상은 건강상 장애를 유발할 수 있어 사회적으로 심각한 문제로 대두되고 있다(Ha et al., 1999).

낙동강 유역에 내리는 강수의 70% 이상은 6월부터 9월 사이에 발생하고 10월부터 이듬해 5월까지의 하천의 유량이 작은 평수기 또는 갈수기이다. 특히, 3월부터 5월 사이의 봄철에는 유량이 작아 부영양화가 심각해질 수 있다. 그럼에도 불구하고 이 시기에 낙동강에서는 체류시간의 증

가에 의한 동물플랑크톤의 번성이 강하게 발생하여 상당부분의 식물플랑크톤이 섭식되어 수질이 개선되는 현상이 보고되었다(Kim et al., 1998; Kim and Joo, 2000).

식물플랑크톤의 양을 나타낼 수 있는 Chl-a의 측정값은 물금지점의 경우에 겨울철에 크고 여름철이 되면 현저히 작아진다. 1990년대 중반에는 여름에 남조류 대번성에 의해 매우 높은 Chl-a 값이 관측되기도 하였지만(Ha et al., 1999), 최근에는 여름 남조류 번성이 빈번한 홍수에 의해 거의 나타나지 않았다(Jeong et al., 2007).

동물플랑크톤은 수온이 낮은 겨울철에는 성장이 제한되다가 봄에 수온이 상승하면 성장이 활발해진다. 이와 함께 가을에 태풍이 지나간 뒤 일정 시기(10~11월 사이)에 성장이 활발해진다. 동물플랑크톤이 식물플랑크톤을 섭식하여 번성하게 되면 식물플랑크톤의 농도는 작아지게 된다. 특히 봄철 저수기에는 매우 강한 관계가 발현된다. 수질모의에서 동물플랑크톤의 개체수를 입력하면 식물플랑크톤과의 먹이-포식자 관계가 반영되어 Chl-a의 모의가 정확해질 수 있다. 이것이 수질모의에서 동물플랑크톤이 필요한 이유이다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
peterlee@pknu.ac.kr

낙동강 하류 구간의 수질을 모의하기 위한 모형을 구축하기 위하여 동식물플랑크톤간의 섭식 작용에 관한 정보를 반영할 필요가 있다. 하지만, 현재까지의 수질 모의 연구에서는 극히 일부의 경험론적 모형을 제외하면 섭식관계의 정보가 모형에 반영된 사례가 거의 없다(Jeong et al., 2006).

본 연구의 목적은 수질 모의 모형을 이용하여 낙동강 하류인 물금지점의 부영양화를 모의하고 예측하는 것이다. 부영양화 모의에는 관측된 동물플랑크톤 개체수를 입력하며, 동물플랑크톤 개체수를 이용한 모의결과와 과거의 수질 측정결과를 비교하고자 한다. 수질 모의 모형은 동물플랑크톤 개체수를 입력할 수 있는 WASP모형으로 하였다. 논문의 보다 상세한 내용은 최정민(2008)에 수록되어 있다.

2. 연구방법

2.1. WASP모형의 개요

WASP 모형은 최초로 Di Toro 등(1983)에 의해서 개발되어 다양한 적용을 통한 수정·보완을 거쳐 미국 환경청에 의해 발표되었다. WASP 모형은 널리 사용되어, Lung and Larson(1995)은 WASP5를 Mississippi 강에 적용하였고, Hernandez 등(1997)은 microcosms의 예측을 통한 플랑크톤과 영양물질의 거동을 해석하였으며, Wang 등(1999)은 Tampa Bay의 유입 영양물질과 수질의 관계를 분석하였다.

국내에서는, 조홍연 등(1993)이 팔당호에 WASP 모형을 적용하였으며, 김진호 등(2008)은 유역의 부하모형과 WASP5를 적용하여 대청호의 BOD, total-N, total-P를 모의하였다. 성기준(1993)은 한강 본류구간에 WASP모형과 QUAL2E 모형 및 AUTO-QUAL 모형을 적용하여, WASP 모형이 질산성질소를 제외한 수질항목에서 높은 정확도를 나타낸다고 제시하였다. 유하나와 서동일(2007)도 WASP7.2와 QUAL2E를 한강 하류에 적용하여 BOD, total-P, total-N을 모의하였고, WASP7.2의 BOD, total-P 모의 결과가 QUAL2E의 결

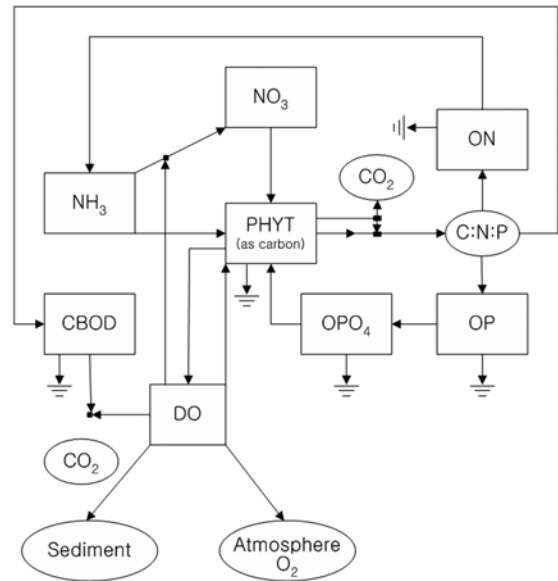


Fig. 1. Eutrophication state variable interactions.

과보다 실측치에 가까움을 제시하였다.

국·내외의 여러 WASP모의에서는 Chl-a의 사멸률을 입력하여 수질을 모의하였다. 본 연구에서는 Chl-a의 사멸률 뿐만 아니라 동물플랑크톤의 개체수를 입력하여 모의하고 결과를 비교하였다. 그리고 통계량을 이용하여 모의결과를 분석하였다.

WASP모형은 지표수 내의 수질과 오염물의 반응, 유동을 모의한다. 이 모형은 비정상 상태로 모의할 수 있고 1, 2, 3차원 적용이 모두 가능하므로 하천과 호소에 대하여 모두 사용할 수 있다. 독성물 해석부분인 Toxicant는 유기화학 반응에 관한 동역학을, 퇴적층과 그 상부의 물기둥 내에 용해되거나 흡착된 화합물의 농도를 예측하는 간단한 퇴적형 알고리즘과 결합시킨다. 용존산소 / 부영양화 해석부분인 Eutrophication 부 모형은 용존산소, 탄소성 생화학적 산

Table 1. Levels of complexity in implementing eutrophication model

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 ³⁻	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						

소요구량, 영양물질과 유기물질에 의해 영향을 받는 식물플랑크톤 동역학을 예측한다. 오염물 운송은 제시된 흐름조건이나 다른 동수역학 모형의 결과를 이용하여 처리할 수 있다. Fig. 1은 WASP모형 중 Eutrophication 부 모형의 구성물질간 상호 작용을 나타낸 그림이다. Eutrophication 부 모형은 6가지 종류의 난이도에 따라 수질을 모의할 수 있다 (Table 1).

2.1.1. 흐름 모형

동수역학 모형은 운동방정식과 연속방정식으로 구성되는 천수방정식을 link-node 기법에 의해서 해석한다. 식 (1)은 운동방정식이다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial U}{\partial x} + \alpha_g + \alpha_f + \alpha_w \tag{1}$$

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. 식 (2)는 연속방정식이다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\frac{\partial Q}{\partial x} = -U\frac{\partial A}{\partial x} - A\frac{\partial U}{\partial x} \tag{2}$$

여기서, A 는 단면적(m²), Q 는 유량(m³/sec)이다.

2.1.2. 물질 보존식

수체 내의 용존 물질에 대한 질량 보존식(mass balance equation)은 확산에 의한 효과, 이송에 의한 효과, 생·화학적 변환, 외부로부터의 부하 등을 고려해야 한다. 3차원 질량 보존식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(U_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(U_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(U_z C) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) \\ & + S_L + S_B + S_K \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, C 는 오염물질의 농도(mg/L 또는 g/m³), 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(m²/d), S_L 는 오염물 부하율(g/m³/d), S_B 는 표층수, 저층수 및 하상과 대기를 포함한 경계 부하율(g/m³/d), S_K 는 총 동역학적 변형률로서 양이면 생성항, 음이면 소멸항(g/m³/d)이다.

연직방향과 횡방향으로 물질의 농도가 균일하다고 가정하고 y 와 z 에 대하여 적분하면 식 (3)은 식 (4)와 같은 1차원 질량보존식이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(AC) = \frac{\partial}{\partial x}\left(-U_x AC + E_x A \frac{\partial C}{\partial x}\right) + A(S_L + S_B) + AS_K \tag{4}$$

여기서, A 는 단면적(m²)이다. 위 식의 우변은 세 가지 수질변화 과정인 이송·확산과정(우변의 t 미분 항), 부하과정, 변환과정(우변의 마지막 항)을 나타낸다. 미소체적을 더 큰 인접한 구간으로 확장하고 적절한 이송, 부하, 변환 매개변수를 지정함으로써 물질 보존식은 유한차분형태로 구성될 수 있다.

2.2. WASP 모형의 입력자료 구축

2.2.1. 수질모의 조사지점

WASP모형에 사용될 수질자료의 조사지점은 Fig. 2와 같이 낙동강 본류의 7개 지점과 지류인 금호강, 회천, 황강, 남강, 밀양강의 5개 지점이다. 전체 수질모의 대상하도는 왜관부터 낙동강 하구둑까지의 낙동강본류와 지류인 금호강, 회천, 황강, 남강, 밀양강의 일부이다. 대상하도를 총 72 개의 구간(segment)으로 나누었으며 구간의 평균길이는 약 3.8 km이다.



Fig. 2. The Nakdong River basin and sampling stations.

2.2.2. 유량자료

모의에 사용되는 수위-유량 관계는 낙동강 조사월보(부산광역시, 2003, 2004, 2005)의 관측 유량과 한국수문조사연보(건설교통부, 2003, 2004, 2005)의 수위자료를 사용하여 나타내었다. 추정된 수위-유량 관계 곡선식은 Table 2와 같다.

2.2.3. 수질 및 기상자료

모형에 입력되는 수질자료는 낙동강 조사월보의 Chl-a, DO, BOD, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N, organic-N, PO₄³⁻-P, organic-P와 수온을 입력하였으며, 기상자료(기상청, 2003, 2004, 2005)는 부산지방의 일사량, 일조율이 입력되었다.

2.2.4. 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, d를 구하기

Table 2. The stage-discharge rating curves of the main stream and the tributaries

Station	Stage (m)	Stage-discharge rating curve
Weagwan	$h < 3$	$Q = 162.783h^3 - 1191.88h^2 + 2943.39h - 2374.36$
	$3 \leq h < 10$	$Q = 6.37886h^3 + 16.1535h^2 - 45.7564h - 41.6969$
Geumhogang	$h < 2.2$	$Q = 38.9215h^3 - 177.7483h^2 + 267.429h - 131.176$
	$2.2 \leq h < 5$	$Q = -50.1868h^3 + 586.726h^2 - 1830.13h + 1732.37$
Hwanggang	$5 < h$	$Q = -3.34202h^3 + 82.2149h^2 - 150.256h + 67.0698$
	$h \leq 5$	$Q = 2731.35 \ln(h) - 3492.86$
Namgang	$h < 1$	$Q = 4.34013 \exp(1.86658h)$
	$1 \leq h < 10$	$Q = 37.5523h^2 - 19.6055h + 12.3685$
Hoecheon	$h < 3.85$	$Q = 30.5455 \ln(h) - 36.5416$
	$3.85 \leq h < 4.337$	$Q = 1827.45h^3 - 22440.90h^2 + 91852.5h - 125282$
	$4.337 < h$	$Q = 59.0989 \ln(h) - 30.1089$

위해 HEC-RAS 모형을 이용한 결과를 회귀분석하였다. 수리계수에 관련된 식은 다음과 같다.

$$V = aQ^b \tag{5}$$

$$D = cQ^d \tag{6}$$

$$B = eQ^f \tag{7}$$

$$Q = V \cdot A = V \cdot D \cdot B = (a \cdot c \cdot e) Q^{b+d+f} \tag{8}$$

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

2.2.5. 동물플랑크톤의 입력 자료

물금지점에 출현하는 동물플랑크톤은 총 23종으로 알려져 있는데, 측정되어 연구에 이용된 동물플랑크톤은 18종이다. 수질모의의 결과는 18종을 입력한 경우와 다음 문단의 주요 6종을 입력한 경우가 차이가 거의 없었다. 본 논문의 3장에는 섭식률이 큰 주요 6종을 입력한 결과를 제시하였다.

WASP 모형에 입력되는 동물플랑크톤의 자료는 개체수이다. 이에 따라 Chl-a의 모의에 관련하여 동물플랑크톤의 개체수를 입력하였으며, 입력된 세부 종으로는 윤충류의 *Brachionus calyciflorus*, *Hexarthra mira*, *Polyarthra* spp, 지각류의 *Bosmina deitersi*, *Bosmina longirostris*, 요각류의 *Cyclops copepodids*가 있다. Table 3은 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 관계를 나타내는 물금지점의 종별 섭식률이다.

2.3. 모형의 적용 내용과 결과의 평가지표

WASP 모의에서는 식물플랑크톤의 성장률과 사멸률을 사용하는 경우가 많다. 그러나 본 연구에서는 식물플랑크톤의 사멸률뿐만 아니라 동물플랑크톤의 개체수 및 섭식률로 모의를 하였다. 모형에 입력된 동물플랑크톤의 개체수는 부산대학교 생물학과에서 측정된 자료(2003~2005년)를 사용하였다.

WASP모형의 보정은 2003년 1월 1일부터 2003년 12월 15일까지 하였다. 모형의 검증은 2003년 12월 16일부터 2005년 12월 31일까지 하였다. 모형의 모의는 Chl-a를 중

Table 3. Species-specific filtering rate (SFR) in the lower Nakdong River as measured by uptake of microspheres

	Species	SFR (mL/animal · day)	Measurement	Model input
Rotifers	<i>Asplanchna priodonta</i>	0.185±0.210	○	
	<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>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 spp.</i>	0.001±0.001	○	
	<i>Monostyla bulla</i>	0.001±0.001	○	
	<i>Polyarthra spp.</i>	0.111±0.057	○	○
	<i>Synchaeta oblonga</i>	0.045±0.002	○	
	<i>Trichocerca spp.</i>	0.010±0.009	○	
Cladocerans	<i>Bosmina deitersi</i>	0.057±0.045	○	○
	<i>Bosmina longirostris</i>	0.157±0.297	○	○
	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	0.453±0.275	○	
	<i>Moina sp.</i>	0.101±0.153	○	
Copepods	<i>Cyclops copepodids</i>	0.258±0.210	○	○

심으로 하였으며, 모의간격과 출력간격은 1일로 모의하였다. 시간에 따른 모의결과를 평가하기 위해 Gupta 등(1999)이 제시한 3가지 통계량을 사용하였다.

통계량은 root mean square error(RMSE; 평균제곱오차의 제곱근), percent bias(PBIAS; 평균 편차의 비율), Nash-Sutcliffe efficiency(NSE; Nash-Sutcliffe 효율성 지수)이다. 통계량의 수식은 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{(1/N) \sum_{t=1}^N (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2} \quad (9)$$

$$PBIAS = \sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_t^{sim}) / \sum_{t=1}^N q_t^{obs} \times 100 \% \quad (10)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2}{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q^{mean})^2} \quad (11)$$

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

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

RMSE는 단순히 모형 예측 오차의 평균 절대 편차를 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 과대 추정되는 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(강신욱과 이상호, 2007).

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질모의 결과

Fig. 3~7에 모형의 보정 기간과 검증 기간 동안의 시간에 따른 Chl-a와 DO, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, total-N, total-P의 모의값과 관측값을 나타내었다. 이외에 BOD, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, organic-N, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$, organic-P의 모의결과도 도시할 수 있으나(최정민, 2008) 지면관계상 생략하였다.

모형보정 과정에서 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 와(Fig. 5) $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 의 경우에 작은 오차로 관측값을 모사할 수 있는 매개변수를 추정하기 어려웠다. 나머지 수질 변수들의 경우에 모형보정 결과는 비교적 작은 오차를 보였으며(Fig. 3, 4, 6, 7) 상세한 내용은 최정민(2008)의 논문을 참조할 수 있다.

통계량 RMSE와 NSE, PBIAS를 사용하여(Table 4) 검증기간의 모의 결과를 다음과 같이 평가하였다.

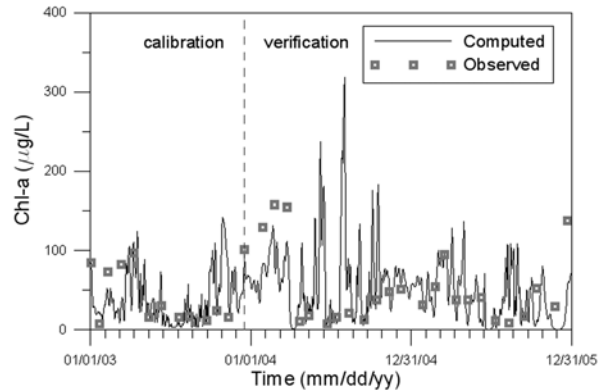


Fig. 3. Simulation results of Chl-a.

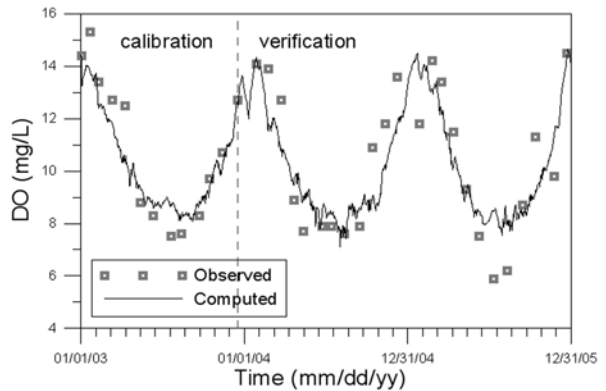


Fig. 4. Simulation results of DO.

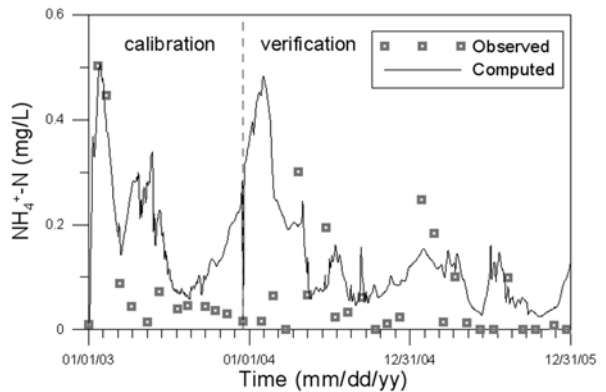


Fig. 5. Simulation results of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$.

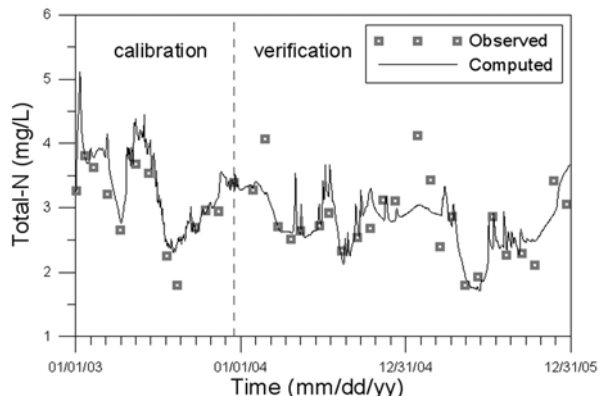


Fig. 6. Simulation results of total-N.

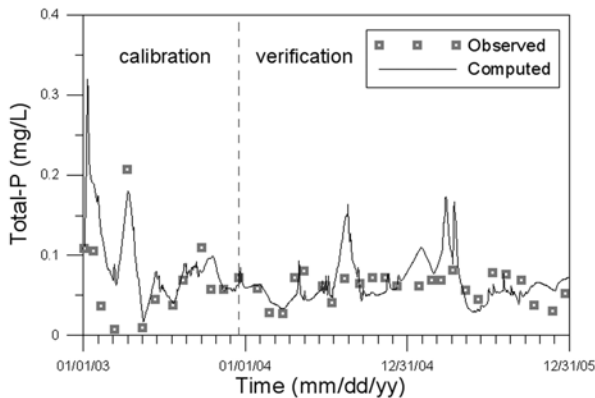


Fig. 7. Simulation results of total-P.

Table 4. Statical analysis of verification results

Item	RMSE	PBIAS (%)	NSE
Chl-a	28.86 (µg/L)	18.86	0.565
DO	1.27 (mg/L)	1.46	0.777
BOD	1.36 (mg/L)	45.92	-0.175
NH ₄ ⁺ - N	0.13 (mg/L)	-45.94	0.128
NO ₃ ⁻ - N	0.45 (mg/L)	-3.04	0.325
Organic-N	0.30 (mg/L)	30.75	0.348
Total-N	0.41 (mg/L)	-2.03	0.522
PO ₄ ³⁻ - P	0.03 (mg/L)	-26.73	-0.283
Organic-P	0.03 (mg/L)	19.20	0.198
Total-P	0.03 (mg/L)	-13.73	0.078

주 관심 대상인 Chl-a는 평균편차의 비율이 18.9%로서 비교에 사용된 관측자료보다 모의값이 다소 작으며 NSE는 0.565로서 모형의 효율은 어느 정도의 적정성을 가지고 있다. 용존 산소의 평균편차 비율은 1.46%이고 NSE는 0.777로 높아 모의 값이 오차도 적고 모형결과가 신뢰적이다.

NO₃⁻ - N와 total-N의 모의 값은 평균편차의 비율이 각각 -3.04와 2.03%로서 오차가 작으나 NSE는 각각 0.325와 0.522로서 다소 작은 값을 보인다. 반면에 NH₄⁺ - N은 평균

편차의 비율이 -45.9%로서 모의값이 과대하고 organic-N은 30.8%로서 모의값이 과소하다. NH₄⁺ - N와 organic-N의 NSE는 각각 0.128, 0.348로서 양호하지 못하다.

Organic-P는 평균편차의 비율이 19.2%로서 다소 크지만 NSE는 0.198로서 양호하지 못하다. PO₄³⁻ - P의 모의결과는 평균편차의 비율이 -26.7%로서 모의값이 과대하며 NSE는 음수값을 보여 모의값 보다 관측값의 평균값을 쓰는 것이 낫은 결과를 보인다. 그럼에도 불구하고 total-P의 모의결과는 평균편차의 비율이 -13.7%로서 그다지 큰 오차를 보이지 않고 RMSE도 0.03 mg/L로서 작으며, NSE도 작으나 양수값 보인다.

WASP의 검증결과를 요약하면, DO는 매우 정확하게 모의되었고, Chl-a, NO₃⁻ - N, total-N은 어느 정도 정확하게 모의되었으며, organic-N, organic-P는 다소 오차가 크나 전체적인 거동은 측정값의 범주에 있다. 반면에 모형보정에서 추정된 매개변수로는 BOD, NH₄⁺ - N, PO₄³⁻ - P를 적절히 모의하지 못하였다.

3.2. 동물플랑크톤 개체수와 식물플랑크톤 사멸률을 이용한 수질모의 비교

앞 절의 Chl-a 모의결과는 동물플랑크톤의 개체수를 입력한 결과이다. 동물플랑크톤 자료 대신에 식물플랑크톤의 사멸률을 입력하여 수질을 모의하였으며 두 결과를 지표로써 비교하였다.

먼저, 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 사멸률 이외의 33개 매개변수에 의한 Chl-a의 모의 민감도를 분석하였다. 그 결과 22개 매개변수의 각각 ±10% 변화에 따른 Chl-a의 민감도는 ±0.01% 미만이었다. 나머지 매개변수 5개, 3개, 2개, 1개의 ±10% 변화에 따른 Chl-a의 민감도는 각각 ±0.01~0.1%, ±1.8~3.7%, ±6.3~14%, -12~61%였다(Table 5). 다시 말하여, Chl-a 모의값은 27개 매개변수에 대하여 매우 둔감하였다.

동물플랑크톤 개체수와 식물플랑크톤의 사멸률 각각을 사용하여 WASP 모형을 보정할 수 있다. 그렇지만, 매개변

Table 5. Parameter sensitivity of chlorophyll-a in WASP simulation

Variable	Parameters	Value	Average sensitivity of chlorophyll-a%	
			10% increase	10% decrease
Chl-a	Phytoplankton maximum growth rate @20°C	5	14.04	-12.81
	Phytoplankton growth temperture coefficient	1.041	-12.03	61.27
	Phytoplankton carbon: chlorophyll ratio	50	-0.08	0.08
	Phytoplankton optimal light saturation	350	-3.69	3.75
	Phytoplankton half-saturation constant for phosphorus	0.005	-1.71	1.81
	Phytoplankton endogenous respiration rate @20°C	0.02	-2.38	2.46
	Phytoplankton respiration temperature coefficient	1.045	6.17	-6.25
	Phytoplankton zooplankton grazing rate constant	0.001	-0.56	0.60
	Phytoplankton phosphorus: carbon ratio	0.001	-0.08	0.08
	Phytoplankton nitrogen: carbon ratio	0.001	0.00	0.00
Organic phosphorus	Mineralization rate constant for dissolved organic P @20°C (per day)	0.22	0.38	-0.45
	Dissolved organic phosphorus mineralization temperature coefficient	1.08	-0.24	0.63
Other twenty two parameters for DO, ammonia, orthophosphate etc.		-	-0.01	0.01

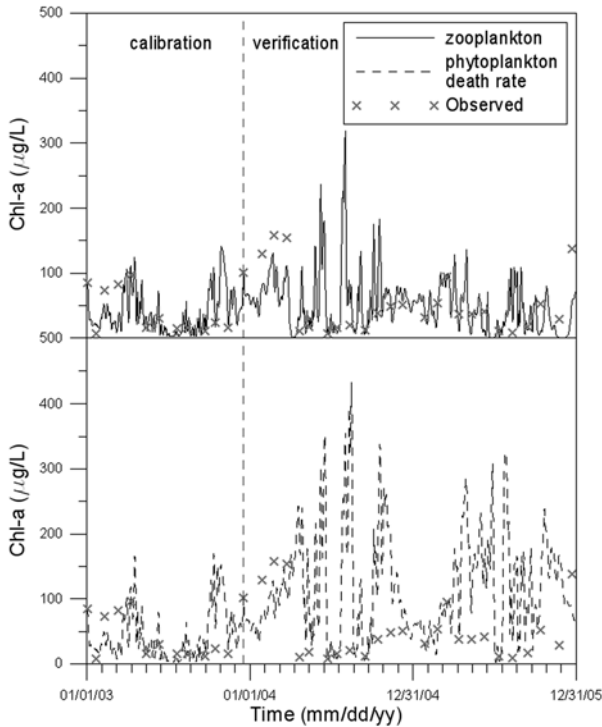


Fig. 8. Comparison between simulation results based on zooplankton and those based on phytoplankton death rate.

수의 수가 매우 많고 민감한 매개변수가 많은 경우에 적절한 매개변수 조합을 결정하기 매우 어려우므로, 동물플랑크톤의 개체수를 사용하여 33개 매개변수를 추정하고서, 이를 식물플랑크톤의 사멸률을 사용한 WASP 모의에도 사용하였다. 동물플랑크톤의 개체수를 사용한 Chl-a의 모의결과와 식물플랑크톤의 사멸률을 사용한 모의결과 비교는 Fig. 8과 Table 6에 나타내었다.

모형의 보정기간에서는 동물플랑크톤 개체수를 입력한 Chl-a의 모의 결과와 식물플랑크톤의 사멸률을 입력한 결과가 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 8). 모형의 검증기간에서 통계량을 분석한 결과 Chl-a의 PBIAS는 식물플랑크톤의 사멸률을 입력한 것이 -39.95%로서 동물플랑크톤 개체수를 사용한 결과인 18.87%보다 절대 수치로는 두 배가 넘는 오차의 규모를 보였다. 그리고 관측값보다 계산값이 크게 모의되었음을 알 수 있다. RMSE는 식물플랑크톤의 사멸률을 입력한 결과가 동물플랑크톤 개체수를 사용한 결과보다 2.8배 컸다. NSE의 경우에도 식물플랑크톤의 사멸률을 입력한 결과가 -1.397로 최소값인 0보다 작기 때문

Table 6. Comparison between the results based on zooplankton and those based on phytoplankton death rate using statistics

Statistics	Zooplankton	Phytoplankton death rate
RMSE (µg/L)	28.86	82.12
PBIAS (%)	18.87	-39.95
NSE	0.565	-1.397

에 모의가 부적절함을 알 수 있다.

이 결과 동물플랑크톤의 개체수를 입력하여 모의하는 것이 Chl-a의 사멸률을 입력하여 모의하는 것보다 관측값을 정확하게 모의하는 것으로 나타났다.

Kim 등(2000)은 동물플랑크톤의 섭식에 의한 일시적인 붐철 수질개선 현상을 호수나 저수지에서 관측되는 맑은물 시기(clear water phase)라고 지칭하였다. 특히 이 시기에는 선택적으로 섭식이 가능한 식물플랑크톤을 저감시키기 때문에 Chl-a의 절대량이 크게 감소하며 식물플랑크톤의 종 조성까지 급변하는 양상을 보인다. 본 연구의 조사시기에서도 대동소이한 양상이 관측되었으며, 낙동강 하류와 같은 조절강 생태계에서는 수질 모의를 위해서 동물플랑크톤 생태 정보를 모형에 반영하는 것이 매우 적절함을 알 수 있다. 이 정보는 또한 수질 모형을 생태 모형으로 변환 적용할 수 있는 계기가 되며, 차후 수질의 모의뿐만 아니라 생물분류군의 동태 예측에 대한 기초 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 WASP모형을 이용하여 낙동강 하류 물금 지점의 부영양화를 모의하였다. 부영양화 모의에는 관측된 동물플랑크톤 개체수를 사용하였으며, 모의된 결과를 과거의 수질 측정결과와 비교하였다. 그리고 모형검증 결과를 통계량으로 분석하여 비교하였다.

WASP 모형의 보정기간과 검증기간 모두 10개 수질항목 중 Chl-a, DO, NO₃⁻-N, organic-N, total-N, total-P의 항목들이 적절히 모사되었다. 그렇지만, 보정기간인 2003년의 수질 모의결과 NH₄⁺-N, PO₄³⁻-P, organic-P는 관측값과 모의값의 차이가 컸다. 모형의 검증기간인 2004~2005년의 수질모의 결과 BOD, NH₄⁺-N, PO₄³⁻-P, organic-P의 모의도 적절하지 않았다.

WASP 모의에 보통 사용되는 식물플랑크톤의 사멸률 대신 동물플랑크톤 개체수를 입력한 결과 모형의 보정기간에서는 동물플랑크톤 개체수를 사용한 결과와 식물플랑크톤의 사멸률을 사용한 결과가 비슷하였다. 그러나 모형 검증기간의 통계량 분석결과 PBIAS는 식물플랑크톤의 사멸률을 사용한 것이 동물플랑크톤의 개체수를 사용한 결과보다 절대값에서 두 배 이상 큰 값을 보였다. 즉, 오차의 절대 규모가 두 배 이상 컸다. 또한 NSE의 경우 -1.397로 최소값인 0보다 작으므로 모의가 적절하지 않았다. 즉, 동물플랑크톤의 개체수를 사용하여 모의하는 것이 실제 현상보다 적절히 모의하는 것으로 나타났다.

사 사

이 논문은 낙동강 물환경연구소의 2006년도 환경기초조사사업 중 ‘생태모형의 주요 변수 추출 및 생물 분류군의 관계 해석과 장·단기 예측에 관한 연구’의 일부로 수행되었으며, 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- 강신욱, 이상호(2007). 다단계 자동보정 기법에 의한 NWS-PC 모형 매개변수의 추정. *대한토목학회논문집*, **27**(3), pp. 211-218.
- 건설교통부(2003). *낙동강 조사월보*.
- 건설교통부(2004). *낙동강 조사월보*.
- 건설교통부(2005). *낙동강 조사월보*.
- 기상청(2003). *기상월보*.
- 기상청(2004). *기상월보*.
- 기상청(2005). *기상월보*.
- 김진호, 신동석, 권순국(2008). 대형댐 유역관리를 위한 수정-WASP5 모형의 적용. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(1), pp. 7-18.
- 부산광역시(2003). *낙동강 조사월보*.
- 부산광역시(2004). *낙동강 조사월보*.
- 부산광역시(2005). *낙동강 조사월보*.
- 성기준(1993). 하천 수질모형의 비교분석에 관한 연구. 석사학위논문, 서울대학교.
- 유하나, 서동일(2007). 한강 하류에 대한 비정상상태 모델 WASP7.2 동시 적용에 관한 연구. *공동춘계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. 32-40.
- 조홍연, 전경수, 이길성, 한광석(1993). WASP4 모형의 매개변수추정-팔당호를 중심으로. *대한토목학회논문집*, **13**(4), pp. 177-188.
- 최경민(2008). WASP 7.2와 신경망모형을 이용한 낙동강의 수질모의 및 예측. 석사학위논문, 부경대학교.
- Di Toro, D. M., Fitzpatrick, J. J., and Thomann, R. V. (1983). *Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) and Model Verification Program (MVP) documentation*. Hydro-science, Inc., Westwood, NY.
- 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*, **4**(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*, **50**, pp. 89-94.
- Hernandez, P., Ambrose, R. B. Jr, Prats, D., Ferrandis, E., and Asensi, J. C. (1997). Modeling eutrophication kinetics in reservoir microcosms. *Water Research*, **31**(10), pp. 2511-2519.
- Jeong, K. S., Kim, D. K., and Joo, G. J. (2007). Delayed influence of dam storage and discharge on the determination of seasonal proliferations of *Microcystis aeruginosa* and *Stephanodiscus hantzschii* in a regulated river system of the lower Nakdong River (South Korea). *Water Research*, **41**, pp. 1269-1279.
- Jeong, K. S., Recknagel, F., and Joo, G. J. (2006). Prediction and elucidation of population dynamics of the blue-green algae *Microcystis aeruginosa* and the diatom *Stephanodiscus hantzschii* in the Nakdong river-reservoir system (South Korea) by a recurrent artificial neural network. *Ecological Informatics: Scope, Techniques and Applications*, F. Recknagel (ed.), Springer, Berlin, pp. 195-213.
- Kim, H. W., Ha, K., and Joo, G. J. (1998). Eutrophication of the lower Nakdong River after the construction of an estuarine dam in 1987. *International Review of Hydrobiology*, **83**, pp. 65-72.
- 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*, **22**, pp. 1559-1577.
- Kim, H. W. and Joo, G. J. (2000). The longitudinal distribution and community dynamics of zooplankton in a regulated large river: a case study of the Nakdong River (Korea). *Hydrobiologia*, **438**, pp. 171-184.
- Lung, W. S. and Larson, C. E. (1995). Water quality modeling of upper Mississippi River and Lake Pepin. *Journal of Environmental Engineering*, **121**(10), pp. 691-699.
- Wang, P. F., Martin, J., and Morrison, G. (1999). Water Quality and Eutrophication in Tampa Bay, Florida, Estuarine. *Coastal and Shelf Science*, **49**, pp. 1-20.