

WASP5 모형에 의한 새만금호의 수질 매개변수 추정

박영기 · 최문술* · 이장춘

국립익산대학 토목환경과

*군산대학교 해양생명개발학과

(1999년 8월 12일 접수, 2000년 2월 3일 채택)

Estimation on Parameters of Water Quality in the Saemanguem Lake by WASP5 Model

Young-Ki Park · Moon-Sul Choi* · Jang-Choon Lee

Department of Civil and Environmental Engineering, Iksan National College

**Department of Marine Life Development, Kunsan National University*

ABSTRACT

Model parameters of the WASP5 applied to Saemanguem lake were estimated. The methodology is based on grouping water quality constituents and relevant parameters and successively estimating each group of parameters by a trial-and-error procedure. Chlorophyll-a, nitrogen cycles, phosphorus cycles, BOD and DO were simulated at the complexity level 4. The Saemangeum basin divided into a number of unit sub-watershed. And a water budget model analysis with 22 years from 1975 to 1996 year was examined. In this paper, input data at upstream boundaries of model was made to determine seasonally-averaged flow rate through water budget analysis. Calibration and verification of the model were used seasonal average of water quality measurements in 1997 and 1998 years. Grouping water quality constituents and associated parameters proved to be efficient in estimating a number of model parameters. From the results of model calibration and verification, it was found that quantitative evaluations of nonpoint source for organic matters are essential.

Key Words : Saemanguem Lake, Group of Parameters, Trial and Error Procedure, Water Budget Analysis, Calibration and Verification, Nonpoint Source

요 약 문

WASP5 모형을 새만금호에 적용하여 모형의 매개변수 추정을 수행하였다. 추정방법으로는 수질항목 및 매개변수들을 몇 개의 군으로 나누어, 각 군의 매개변수들을 시행착오법에 의하여 순차적으로 추정하는 방법을 사용하였다. 모의 수질항목으로서 엽록소 a, 질소 순환요소들, 인 순환요소들, BOD 및 DO 등을 포함하였으며, 복잡도 4에서 수질을 모의하였다. 새만금 담수호의 전체유역을 수 개의 물수지 단위 소유역으로 구분하여 물수지 분석을 하였다. 본 연구에서는 물수지 분석모형에 의한 1975년부터 1996년까지 22년간 월별 평균유입량을 산정하여 모형의 상류계단에서의 유량 입력자료로 이용하였다. 1997 및 1998년의 수질측정자료는 계절별 평균치와 함께 계절별 매개변수의 보정 및 검증에 각각 사용하였다. 수질항목 및 관련 매개변수들을 계절별로 분류하여 추정하는 것이 많은 수의 매개변수 추정에 있어서 효율적인 방법임을 알 수 있었다. 모형의 보정 및 검증 결과, 유기물의 비점오염원에 대한 정량적 평가가 필요함을 알 수 있었다.

주제어 : 새만금호, 매개변수의 분류, 시행착오법, 물수지 분석, 보정과 검증, 비점오염원

1. 서 론

인구의 증가와 급속한 산업발달 등으로 인하여 날로 심각해지고 있는 수질오염에 대한 우려와 관심이 높아짐에 따라, 하천 및 호소의 수질모형의 개발 및 적용에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 하천에 비하여 유속이 매우 작고 체류 시간이 긴 호수에서는 하천으로부터 유입된 유기물 등이 상당기간 동안 누적되어, 조류의 과다성장을 초래하고 산소를 고갈시켜 어류의 사멸, 수초의 번성 등을 야기하는, 이른바 부영양화 현상을 일으키곤 한다. 도시의 팽창과 산업의 발달, 농약 및 비료사용의 급증은 자연상태에서 수십년이 걸리는 이러한 부영양화 과정을 불과 몇 년으로 단축하게 되었다. 이렇듯 부영양화는 호소 수질오염의 가장 큰 문제이며, 따라서 호소 부영양화는 부영양화를 일으키는 질소, 인 등 영양염류의 화학적, 생물학적 반응구조와 이에 따른 부영양화 정도의 평가내지는 예측을 중심으로 발전되어 왔다. 초기에는 Vollenweider 모형으로부터 시작된 인의 양으로부터 호수의 영양상태를 평가하는 인모형에 관한 연구가 활발하였으나, 현재에는 조류, 질소, 인, BOD 및 DO 등 여러 수질항목들간의 상호반응을 포함하는 생태학적 수질모형(Eutrophication model)이 널리 개발되어 사용되고 있다.¹⁾

수질모형의 궁극적인 목적은 모형적용 대상지역에서의 수질을 평가 또는 관리하는 것이나, 이를 위해서는 수질항목들간의 반응계수 등으로 구성되는 매개변수의 추정, 즉 모형의 보정 및 검증이 선행되어야 한다. 같은 모형을 사용할 경우에도 이러한 매개변수들은 그 적용지역에 따라 일반적으로 다른 값들을 가지며 변수들간의 상대적 중요성도 달라지게 된다.²⁾ 비교적 그 구조가 간단한 BOD 및 DO의 모의모형에 대해서는 최적화에 의한 매개변수의 추정방법도 연구, 개발되어 왔으나,^{3,4)} 모형의 구조가 복잡하고 그에 따라 추정할 매개변수가 많아질 경우에는 보통 시행착오법에 의존하여 모형을 보정하게 되어 많은 노력을 요하게 된다. 이 때에는 특정지역에서의 모형적용 경험에서 나오는 사전지식이나 사용자의 직관이 유용하게 사용되기도 한다. 본 연구에서는 호소 및 하구의 수질모형으로서 널리 사용되고 있는^{5,6)} 생태학적 수질모형인 WASP5 모형⁷⁾을 새만금호에 적용하여, 모형의 보정과 검증을 수행하였다.

새만금지구 개발사업은 대단위 간척종합 개발사업으로서 국토의 확장과 수자원개발 등 긍정적인 개발목표에도 불구하고 공사가 진행중인 현시점에서 수질오염에 대한 우려가 예상되고 있어서 효과적인 수질관리대책 수립을 통한 적정수질 확보에 관한 일반의 관심이 더욱 고조되고 있는 실정이다. WASP4

모형을 사용한 팔당호 수질모델링에 관한 기존의 연구^{8,9)}가 있으나, 매개변수 추정에 있어서 변수들간의 상대적 중요성에 관한 판단의 근거가 될만한 기존의 연구가 거의 없는 상태이기 때문에, 본 연구에서는 가능한 많은 수의 매개변수를 추정 대상변수로 포함하되, 매개변수들을 관련된 수질항목의 종류에 따라 몇 개의 군으로 나누어 추정함으로써 추정의 효율성을 높이고자 하였다. 본 연구는 장래수질의 계절별 모의과정의 한 단계로서 수행되었으며, 따라서 봄, 여름 및 가을의 세 계절에 대하여 계절별로 매개변수의 추정을 수행하였다.

2. 모형의 구성

2.1. WASP5 모형의 구조

WASP5 모형은 동수역학적 흐름모형인 DYNHYD5 모형, 생태학적 수질모형(Eutrophication mode)인 EUTRO5 모형 및 독성물질에 대한 수질 모의모형인 TOXI5 모형으로 구성된다. DYNHYD5 모형은 1차원 비정상 흐름에 대한 연속방정식 및 운동량방정식으로 구성되며 EUTRO5 모형 및 TOXI5 모형의 수행을 위한 수리학적 입력자료(수위, 유속, 유량 등)를 제공하는 모형이다. 수리학적 입력자료는 DYNHYD5 모형에 의하지 않고 직접 입력하여 사용할 수도 있다. 본 연구에서는 DYNHYD5 모형에 의하여 흐름계산을 수행하고 그 결과를 입력자료로 사용하여 EUTRO5 모형에 의한 수질모의를 수행

하였다.

EUTRO5 모형은 모의 수질항목의 종류 및 수질 반응모형에 따라 6개의 복잡도(Table 1 참조)를 가지며 이 중 하나의 복잡도를 선택하여 그에 따른 수질모의를 수행할 수 있다. 복잡도 4, 5 및 6은 조류(phytoplankton 또는 chlorophyll-a), 암모니아성 질소(NH₃-N), 질산성 질소(NO₃-N), 유기질소(Organic N), 인산염 인(PO₄-P), 유기인(Organic P), 생화학적 산소요구량(CBOD), 용존 산소량(DO) 등 8개의 수질항목을 모의하는데, 복잡도 4는 선형 반응모형을 사용하며, 복잡도 5는 비선형 반응 및 탈질산화 과정을 포함하고, 복잡도 6은 수질항목과 저층생물군의 상호작용(benthos interaction)을 모의할 수 있다. 본 연구에서는 자료의 가용성, 모형수행의 난이도 등을 고려하여 복잡도 4에서 모형을 수행하였다.

2.2. DYNHYD5 모형(Hydrodynamics Model)

DYNHYD5 모형은 분기된 계산격자망 또는 수로-구획(링크-노드식 연결형태) 계산격자망에 대하여 바람에 의한 응력, 마찰력, 중력의 영향을 고려한 1차원 연속방정식, 운동량방정식을 지배방정식으로 한다. 지배방정식은 식 (1), (2)와 같으며, 링크(본 모형의 수로에 해당)에서는 운동량방정식을 이용하여 유속과 유량을 계산하고, 노드(본 모형의 구획에 해당)에서는 연속방정식을 이용하여 수위를 계산한다.

Table 1. EUTRO5 systems and levels of complexity

System Number	Name	Use in Complexity Levels					
		1	2	3	4	5	6
1	Ammonia Nitrogen(NH ₃ -N)		X	X	X	X	X
2	Nitrate Nitrogen(NO ₃ -N)			X	X	X	X
3	Inorganic Phosphorus(PO ₄ -P)				X	X	X
4	Phytoplankton(Chlorophyll-a)				X	X	X
5	Carbonaceous BOD(CBOD)	X	X	X	X	X	X
6	Dissolved Oxygen(DO)	X	X	X	X	X	X
7	Organic Nitrogen(ON)			X	X	X	X
8	Organic Phosphorus(OP)				X	X	X

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = a_g + a_f + a_w \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \left(\frac{1}{B}\right) \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

여기서, U는 흐름방향의 유속(m/s), H는 구획에서의 수위(m), B는 구획을 연결하는 수로의 폭(m), Q는 수로에서의 유량(m³/sec)이다. 또한, a_g는 중력가속도항(= -g $\frac{\partial H}{\partial x}$), a_r는 바닥마찰항($gn^2 R^{4/3} U|U|$, n은 조도계수, R은 동수반경), a_w는 바람에 의한 용력항으로 본 연구에서는 무시하였다.

2.3. EUTRO5 모형(Eutrophication Model)

EUTRO5 모형의 지배방정식은 흐름방향의 단면에 대하여 적분된 1차원 질량보존식으로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(A C_i)}{\partial t} + \frac{\partial(A u C_i)}{\partial x} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(A E_x \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + A S_{Li} + A S_{Bi} + A S_{Ki} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 A는 구획경계의 단면적, C_i는 구획의 i번째에 해당하는 수질항목의 농도, u 및 E_x는 각각 흐름방향의 평균유속, 확산계수이다. E_x는 유속 및 수심 등에 따라 변화하는 가변상수이나 EUTRO5 모형의 경우에는 일정한 값을 입력하도록 되어있다. 단, 경계조건의 시간변화가 없는 정상상태 수질계산에 있어서는 E_x값에 따른 수질계산 결과의 변화는 사실상 없게 된다. 그리고 S_{Li}, S_{Bi}, S_{Ki}는 각각 구획의 특정지역에 직접적으로 부하되는 i번째에 해당하는 수질항목의 오염부하율(점오염원) 또는 전지역에 균일하게 부하되는 오염부하율(비점오염원), 경계구획에서의 오염물부하율, 반응에 의한 변화율이다. 지배방정식의 기본형태는 식 (3)과 같으며, S_{Ki}를 수질항목별로 각각 다르게 구성하기 때문에 모의하고자 하는 수질항목의 개수만큼 지배방정식이 구성되며, 각각의 수질항목에 해당되는 고유번호가 부여된다. 복잡도 4의 경우, EUTRO5 모형의 지배방정식은 8개로 구성되며, 각각은 모의할 8개 수질항목

의 반응식을 포함하고 있다.

본 연구에서는 사용한 수질항목의 모의를 위한 반응식들은 다음과 같다.

$$S_4 = (G_{pl} - D_{pl} - \frac{\sigma_4}{H}) C_4 \quad (4)$$

$$S_8 = a_{pc} D_{pl} C_4 - k_{83} C_8 - \frac{\sigma_8}{H} C_8 \quad (5)$$

$$S_3 = k_{83} C_8 - a_{pc} G_{pl} C_4 - SS_3 \quad (6)$$

$$S_7 = a_{NC} D_{pl} C_4 - k_{71} C_7 - \frac{\sigma_7}{H} C_7 \quad (7)$$

$$S_1 = k_{71} C_7 - k_{12} C_1 - G_{pl} P_{NH_3} (a_{PC} C_4) + SS_1 \quad (8)$$

$$S_2 = k_{12} C_1 - (1 - P_{NH_3}) a_{NC} G_{pl} C_4 \quad (9)$$

$$S_5 = k_{1D} a_{OC} C_4 - K_d C_5 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} S_6 = & k_a (DO_{sat} - C_6) - k_d C_5 - \frac{64}{14} k_{12} C_1 \\ & + \left[\frac{32}{12} G_{pl} - k_{1R} a_{OC} \right. \\ & \left. + \frac{48}{14} a_{NC} G_{pl} (1 - P_{NH_3}) \right] C_4 - \frac{SOD}{H} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 DO_{sat}는 포화산소농도이며 H는 수심이다. 상기 식들에 나타난 반응계수 중 a_{NC}, a_{PC} 및 a_{OC}는 각각 탄소에 대한 질소, 인 및 산소의 비율이며, σ_i는 수질항목 i에 해당하는 침전속도이다. k₇₁, k₁₂, k₈₃, k_d 및 k_a는 각각 유기질소의 가수분해율, NH₃-N의 질산화율, 유기인의 가수분해율, 탈산소계수 및 재폭기계수이다. SS₁, SS₃ 및 SOD는 각각 저면 퇴적물로부터의 NH₃-N의 용출률, PO₄-P의 용출(또는 소멸)율 및 저면 수저생물군에 의한 산소소비율이다. 조류의 성장율 G_{pl}은 일반적으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{pl} = G_{I_{max}} G(I) \cdot G(N) \quad (12)$$

여기서 G_{I_{max}}는 조류의 최대성장율이며, G(I) 및 G(N)은 각각 모형에 의하여 계산되는 빛 및 영양염류에 의한 조류의 성장제한율이다. G(I)는 광도(I), 수심, 광소멸계수(Ke) 등의 함수로서 Smith의 식으로부터 계산되며, G(N)은 무기질소 및 무기인 농도의 함수로서 다음 식으로부터 계산된다.

$$G(N) = \text{Min} \left(\frac{C_1 + C_2}{K_{mN} + C_1 + C_2}, \frac{C_3}{K_{mP} + C_3} \right) \quad (13)$$

여기서 K_{mN} 및 K_{mP} 는 각각 질소 및 인의 반포화상수이다. 조류의 소멸율 D_{PI} 은 zooplankton의 영향을 무시하면 조류의 내생호흡률(k_{1R})과 사멸율(k_{1D})의 합과 같다. 또한 P_{NH_3} 는 NH_3-N 선호계수로 NH_3-N 및 NO_3-N 농도의 함수로서 모형에 의하여 계산된다.⁷⁾

반응계수들 중 k_a , k_d , k_{12} , k_{71} , k_{83} , k_{1R} 및 G_{PI} 은 온도에 따라 변화하는 것들로서, 이하 본 논문에서 언급된 반응계수의 값들은 모두 20℃를 기준으로 한 것이다.

2.4. 새만금호 구획분할 및 지형 입력자료

DYNHYD5 및 EUTRO5 모형의 새만금호 적용에 있어서 상류단 경계는 만경강 하류부의 만경대교 부근, 동진강 하류부의 동진대교, 계화도의 계화갑문, 부안댐 하류부의 직소천 부근이며, 하류단 경계는 신시도갑문, 가력도갑문으로 하여 모형을 구성하였다. 상류단의 경계는 Fig. 1에서 No. 1, 15, 23, 25이고, 하류단의 경계는 No. 13, 27 구획에 해당한다. 이들 지점에서의 수질 측정자료는 모형의 보정(매개변수 추정)시 모형의 수질 경계조건으로 사용되며, Fig. 1에 나타난 M-1, M-2, D-1, D-2, V-1, V-2 지점에서의 수질자료는 계산치와의 비교에 사용된다.

이와 같이 구성된 적용 대상지역의 구획분할은 농업진흥공사의 새만금호 수질측정지점¹⁰⁾ 등을 사용하여 Thiessen 망도를 작성한 후, 지형적인 영향을

고려하여 분할된 구획을 다소 수정함으로써 새만금호를 27개의 구획으로 분할하였다. 구획분할 결과는 Fig. 1에 나타났다. 이와같이 구획을 분할함으로써 모형의 보정에 사용될 수질자료의 측정지점들이 구획의 중심점에 오도록 하였다. 분할된 각 구획의 평균 하상표고는 새만금 간척종합개발사업 계획도를 사용하여 산정하였으며, 각 구획의 표면적은 1:50,000 지형도상에서 획득한 수치자료를 GIS시스템의 ARC/INFO 프로그램을 이용하여 계산하였다.

3. 모형의 보정

3.1. 사용자료

모형의 보정은 1997년의 수질자료를 사용하여 계절별로 수행하였다. 사용된 자료는 3월~10월의 월별 수질자료로서, 이들의 계절별 평균치를 산정하여 평균치 매개변수 추정에 사용하였다. 계절의 구분은 통상적으로 온도를 기준으로 하나, 유량변동 또한 수질에 영향을 미치는 중요한 요소임을 고려하여 3, 4, 5월을 봄철로 6, 7, 8월을 여름철로, 9, 10월을 가을철로 각각 구분하였다. 즉, 9월의 유량은 8월보다는 10월의 유량과 가까운 값을 보임을 감안하여 9월을 가을철로 구분하였다.

모형의 보정을 위한 유량 입력자료로서 상류단 경계인 만경대교, 동진대교, 계화도 및 직소천에서의 새만금호 유입량은 전체유역 331,900ha를 29개의 소유역으로 구분하여 하천네트웍을 작성하고 각 소유역에 대한 유입량과 필요수량을 추정하여 전체 소유역에 걸쳐 하천네트웍에 따라 순차적으로 물수지를 수행한 후 새만금호로 유출되는 양을 추정하였다. 이때 각 소유역별 유입량과 필요수량의 추정 및 물수지는 우리나라 관개용 저수지의 설계 및 물관리를 위하여 개발한 DIROM 모형¹¹⁾에 의하였다. 하류단 경계인 신시도, 가력도 갑문의 방류량은 새만금호내에서 발생하는 증발량과 강수량을 무시하고, 상류경계로부터 들어오는 유입량이 정상상태에 도달하였다고 가정하여 유입량을 갑문비로 배분하여 방류량을 구하였다. 1997년 및 1998년 자료는 DIROM 모형에 의한 1975년부터 1996년까지 22년간의 월

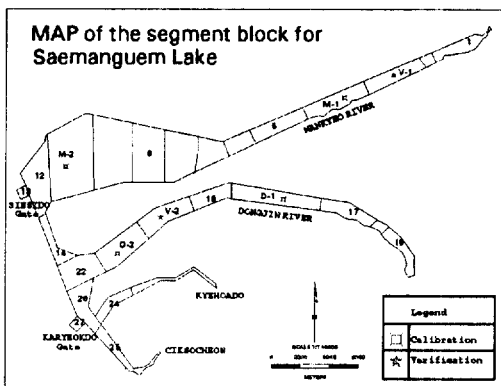


Fig. 1. Map of the segment block for Saemanguem Lake.

Table 2. Flow rate data of the model for calibration and verification

Unit : m³/sec

Basin	Year Season	1997			1998		
		Spring	Summer	Fall	Spring	Summer	Fall
Mankyeong bridge		13.22	39.4	18.25	13.21	38.9	12.09
Dongjin bridge		10.07	21.11	13.62	5.44	23.22	6.859
Okku-Hoihyeon Basin		0.31	1.02	0.63	0.26	0.57	0.143
Cinpong Basin		0.24	0.88	0.38	0.20	0.61	0.181
Koanghoal Basin		0.42	1.43	0.79	0.18	1.104	0.390
Kyehwado Basin		0.9	2.97	1.52	0.39	2.406	0.763
Ciksocheon(Puan Dam)		1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36

*Calculated values by water budget analysis

Table 3. Water quality data of the model for calibration and verification

(a) Spring(March~May, Mean water quality)

Items	Year Observation point	1997			
		M-1	M-2	D-1	D-2
Temperature(°C)		13.7	11.4	14.5	13.1
DO(mg/l)		8.9	10.1	9.9	9.6
T-N(mg/l)		0.523	0.354	0.205	0.071
NH ₃ -N(mg/l)		0.112	0.112	0.140	0.003
NO ₃ -N(mg/l)		0.394	0.234	0.074	0.033
ON(mg/l)		0.017	0.008	0.009	0.035
T-P(mg/l)		0.084	0.046	0.123	0.040
PO ₄ -P(mg/l)		0.011	0.009	0.003	0.003
OP(mg/l)		0.073	0.037	0.120	0.037
Chl. a(mg/m ³)		7.833	5.667	12.667	3.767
CBOD ₅ (mg/l)		3.134	1.733	2.667	1.467

별 평균치를 사용하였다. 이와 같이 유량 및 수위 자료를 경계조건으로 사용하여 수행된 DYNHYD5 모형에 의한 계산결과의 상세한 검증은 비교할 만한 관측자료의 부재로 수행하지 못하였다.

모형의 보정을 위한 상류단 경계(Fig. 1의 No. 1, 15)에서의 유입수질 자료로는 농어촌진흥공사¹⁰⁾의 1997년 월별 측정자료의 계절별 평균치를 사용하였다. 모형의 보정과 검증을 위한 자료에 해당하는 1997, 1998년도의 유입수질 자료¹²⁾를 Table 3에 정리하였다.

하류단 경계인 신시도, 가력도 갑문에서의 경계조건으로는 영의 농도경사를 사용하였다. 수온의 입력

값으로는 새만금호내의 수질 측정지점인 M-1, M-2, D-1, D-2지점(Fig. 1 참조)에서의 수온 측정자료의 평균치를 사용하였으며, 일사량은 전주축후소의 1988년부터 1997년까지의 10년간 측정자료¹³⁾의 월별평균치를, 일조율은 전주, 군산, 정읍, 부안 등 4개 축후소의 1988년부터 1997년까지의 10년간 측정자료¹³⁾의 평균치를 각각 계절별로 산정하여 사용하였다.

3.2. 매개변수의 추정방법

매개변수의 추정방법을 나타내는 흐름도는 Fig. 2

(b) Summer(June~August, Mean water quality)

Year		1997				1998	
Items	Observation point	M-1	M-2	D-1	D-2	V-1	V-2
	Temperature(°C)		25.2	22.9	26.5	25.0	24.5
DO(mg/l)		6.2	6.5	7.2	6.3	8.4	8.0
T-N(mg/l)		0.057	0.009	0.213	0.123	0.663	0.411
NH ₃ -N(mg/l)		0.000	0.002	0.149	0.112	0.149	0.074
NO ₃ -N(mg/l)		0.049	0.003	0.016	0.008	0.347	0.139
ON(mg/l)		0.008	0.004	0.048	0.003	0.128	0.189
T-P(mg/l)		0.032	0.022	0.041	0.022	0.106	0.055
PO ₄ -P(mg/l)		0.011	0.005	0.006	0.002	0.034	0.012
OP(mg/l)		0.021	0.017	0.035	0.020	0.072	0.043
Chl. a(mg/m ³)		3.167	2.700	10.334	2.700	27.720	14.016
CBOD ₅ (mg/l)		1.334	1.400	2.733	2.400	2.540	1.726

(c) Fall(September~October, Mean water quality)

Year		1997				1998	
Items	Observation point	M-1	M-2	D-1	D-2	V-1	V-2
	Temperature(°C)		19.1	19.6	18.6	19.2	20.1
DO(mg/l)		6.7	6.3	7.3	7.3	8.3	8.2
T-N(mg/l)		0.043	0.015	0.177	0.012	0.867	0.326
NH ₃ -N(mg/l)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.311	0.094
NO ₃ -N(mg/l)		0.028	0.007	0.046	0.009	0.213	0.038
ON(mg/l)		0.015	0.008	0.112	0.003	0.284	0.183
T-P(mg/l)		0.070	0.061	0.043	0.045	0.178	0.068
PO ₄ -P(mg/l)		0.010	0.023	0.005	0.025	0.042	0.012
OP(mg/l)		0.060	0.038	0.038	0.020	0.136	0.056
Chl. a(mg/m ³)		3.450	3.450	5.600	6.100	19.292	6.390
CBOD ₅ (mg/l)		3.000	3.400	2.500	1.600	6.300	1.700

와 같다. 8개의 수질항목을 조류, 질소 순환요소들, 인 순환요소들 및 BOD, DO의 4개군으로 구분하였으며, 이에 따라 추정과정을 4단계로 나누어 각군과 관련된 매개변수들을 단계별로 추정하도록 하였다. 각 단계별 추정 매개변수와 추정에 사용되는 수질항목은 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 제 1단계에서는 수질항목들간 상호반응의 중심이 되는 조류와 관련된 매개변수들인 G_{1max} , k_{1R} , k_{1D} , K_e 및 σ_4 를 순차적으로 추정하도록 하였다. 또한 제 2단계에서는 인 순환요소들과 관련된 k_{83} , a_{pc} , SS_3 및 σ_8 을, 제 3

단계에서는 질소 순환요소들과 관련된 k_{71} , k_{12} , a_{nc} , SS_1 및 σ_7 을, 제 4단계에서는 BOD 및 DO와 관련된 매개변수들인 k_d , k_a , a_{oc} 및 SOD를 각각 순차적으로 추정하도록 하였다. 또한 제 2단계 및 3 단계 추정후에는 추정된 매개변수에 따른 조류의 농도(C_4)를 계산하여 4개 비교지점에 대하여 구한 계산치(C_4^{com})와 관측치(C_4^{obs})간 절대편차의 평균치가 어느 범위(ϵ) 이하로 되지 않으면 제 1단계부터 다시 반복하여 추정하도록 하였다.

각 단계에서의 추정방법으로는 매개변수의 값을

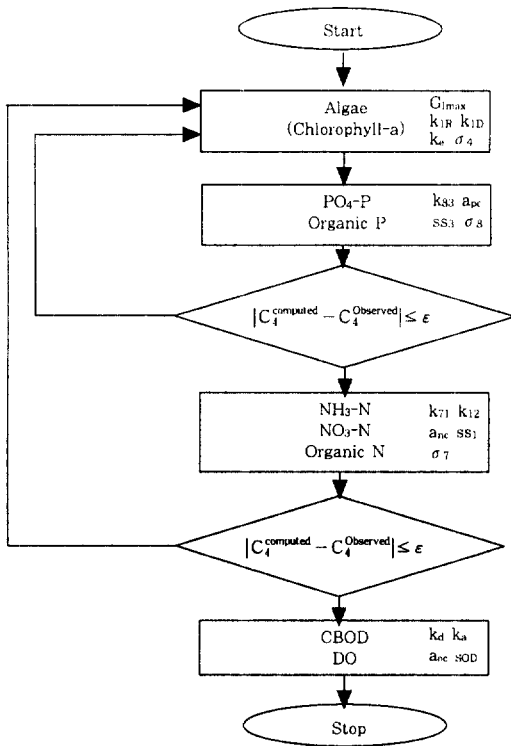


Fig. 2. Flow chart of estimated parameters in the model.

일정한 범위 내에서 변화시켜가며 그에 따른 수질 계산치와 관측치간의 절대편차의 합이 최소가 되도록 변수값을 정하는 시산법을 사용하였다. 각 매개변수값의 범위^{7,9,14-16)}는 Table 4와 같이 설정하였다. 각 단계별 매개변수 추정에 있어서 특정한 한 가지 수질항목에만 관련된 매개변수인 $\sigma_4, \sigma_7, \sigma_8, SS_1, SS_3, SOD$ 등은 같은 군에 속한 매개변수들 중 가장 나중에 보정하도록 하였다. 각 군의 특정 매개변수의 추정을 위한 수질계산에 있어서 그 군에 속한 다른 변수들 중 이미 추정된 것에 대해서는 그 추정치를, 아직 추정되지 않은 것에 대해서는 이전 반복추정시의 추정치를 사용하도록 하였다. 단, 최초의 추정시에는 각 매개변수에 대하여 설정된 값의 범위내에서 임의값을 사용하도록 하였다.

3.3. 모형의 보정결과 및 분석

1997년 자료(3.1절 참조)를 사용하여 계절별로 최종 추정된 매개변수값들은 Table 5에 정리하였으

Table 4. Bound values of used parameters for calibration in the model

Parameter	Bound	Lower Bound	Upper Bound
$G_{max}(1/day)$		1.5	2.5
$K_{1R}(1/day)$		0.05	0.25
$K_{1D}(1/day)$		0.00	0.1
$K_e(1/m)$		0.0	-
$\sigma_4(m/day)$		0.1	0.3
$K_{83}(1/day)$		0.00	0.22
a_{PC}		0.024	0.24
$SS_3(mg/m^2 \cdot day)$		-	-
$\sigma_8(m/day)$		0.001	0.1
$K_{71}(1/day)$		0.001	0.25
$K_{12}(1/day)$		0.1	0.5
a_{NC}		0.05	0.43
$SS_1(mg/m^2 \cdot day)$		0.0	-
$\sigma_7(m/day)$		0.001	0.1
$K_a(1/day)$		0.004	4.24
$K_a(1/day)$		0.0	-
a_{OC}		-	2.67
$SOD(g/m^2 \cdot day)$		0.0	8.4

며, 이 값들을 사용하여 산정된 각 수질항목별 계산치와 관측치의 비교는 Fig. 3에 나타내었다. 계산치와의 비교에 사용된 M-1, M-2, D-1, D-2 지점(Fig. 1 참조)에서의 수질 관측치들은 Table 3에 정리되어 있다. 모형의 보정시 조류 농도의 오차 허용범위 ϵ (Fig. 2 참조)은 0.01mg/l로 하였다. 제 2단계 추정후 조류의 농도 계산치와 실측치간의 절대편차 평균치가 ϵ 이상이어서 조류 및 인순환요소들과 관련된 매개변수들은 2~3회의 반복에 의하여 추정되었으며, 그 밖의 매개변수들은 모두 한두 차례 추정으로 모형의 보정이 완료되었다.

Fig. 3에 나타낸 모형의 보정결과 중 몇 개의 수질항목의 경우 봄철에는 chlorophyll-a, NO_3-N 가 과대평가되고 있고, NO_3-N 는 관측치와 계산치의 편차가 큰 경향이 나타나고 있는데, 이들은 주로 오

Table 5. Results of estimated parameters in the model

Parameter	Season		
	Spring	Summer	Fall
$G_{I_{max}}$ (1/day)	2.0	2.0	2.0
K_{IR} (1/day)	0.05	0.1	0.15
K_{ID} (1/day)	0.0	0.1	0.1
K_e (1/m)	0.4	0.5	0.4
σ_4 (m/day)	0.1	0.2	0.2
K_{S3} (1/day)	0.1	0.05	0.05
a_{pc}	0.18	0.2	0.2
SS_3 (mg/m ² ·day)	10.0	10.0	20.0
σ_8 (m/day)	0.01	0.01	0.01
K_{71} (1/day)	0.02	0.03	0.09
K_{12} (1/day)	0.1	0.1	0.3
a_{nc}	0.4	0.4	0.4
SS_1 (mg/m ² ·day)	50.0	200.0	-100.0
σ_7 (m/day)	0.01	0.01	0.01
K_d (1/day)	0.25	0.5	0.5
K_a (1/day)	0.0	0.6	1.2
a_{oc}	2.6	2.6	2.6
SOD (g/m ² ·day)	1.0	1.0	1.0

염이 심한 만경강, 동진강 유입수역 부근 관측지점 (Fig. 1의 M-1 및 D-1 지점)에 대한 비교결과로서 대부분의 경우 관측치가 계산치보다 큰 값을 보이고 있다.

가을철에는 NH₃-N 농도가 영(Zero)이 아님에도 불구하고 관측농도가 영으로 나타나, 소멸항(음의 SS₁)을 크게 함으로써 모형을 보정하였다. 또한, DO농도 관측치는 수온 관측치에 따른 포화산소농도(DO_{sat}) 값보다 큰 과포화 상태를 나타내고 있는데, 이를 보정하기 위해서는 조류의 성장률(G_p)을 크게 해야한다(식 (11) 참조). 그러나, NH₃-N의 농도를 관측치인 영이 되도록 보정할 경우 조류성장을 또한 영으로 되기 때문에 (식 (12) 및 (13) 참조) DO 농도를 포화농도 이상이 되도록 보정할 수 없게 된다. 따라서 과포화된 DO에 대한 모형의 보정은 불가능하였다. 유기인은 봄철과 여름철에, 유

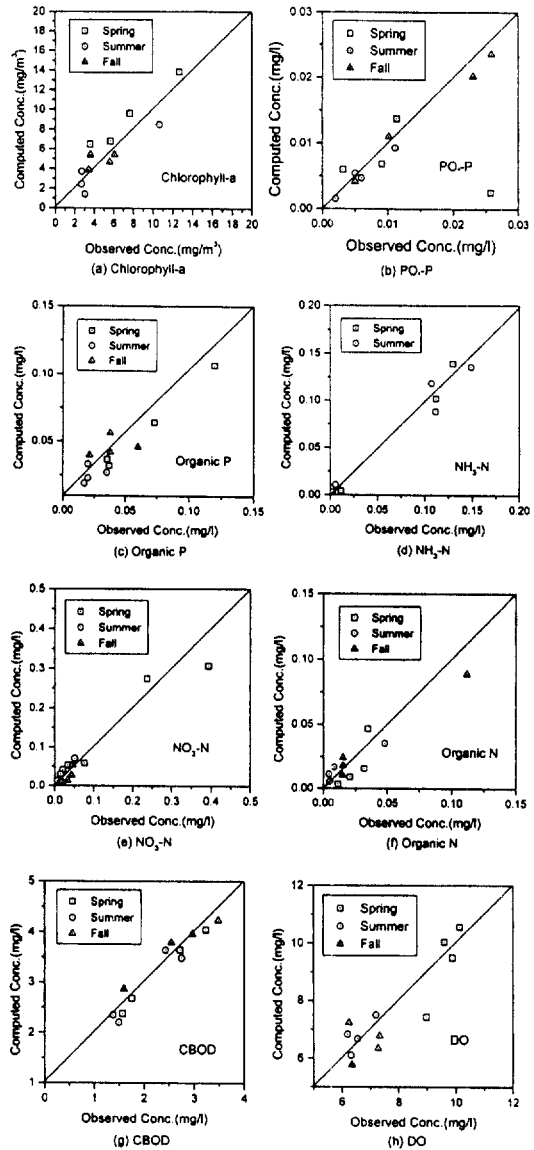


Fig. 3. Results of calibration in the model.

기질소는 봄철에 계산치들이 관측치들보다 일관적으로 과소추정되는 결과를 보이고 있다. 이는 호수 등으로 인한 유량의 증가와 함께 호수경계를 통하여 유입되는 비점오염원의 영향 때문인 것으로 생각된다.

또한, 다른 호수와 비교하여 보기 위해서 Table 6에 기존 연구의 매개변수 값을 나타냈다. 질산화 계수인 K₁₂의 경우 팔당호에 적용된 타 연구결과에 비해 다소 큰 값으로 보정되었고, 이는 암모니아성 질소가 분해되어 유입되고 있음을 보여주고 있다. 만

Table 6. Comparison of parameters using WASP5 model

Source Parameter	Manual ¹⁷⁾	Kim ⁹⁾	Hwang ⁸⁾	Yu ⁽⁴⁾	this study
G_{lmax}	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
K_{IR}	0.125	0.125	0.125	0.0005	0.1
K_{ID}	0.02	-	0.03	0.04	0.06
K_e	-	-	-	-	0.43
σ_4	-	-	-	-	0.16
K_{S3}	0.22	-	0.22	0.04	0.06
a_{PC}	0.025	-	0.02	0.01	0.19
SS_3	-	-	-	-	13.3
σ_8	-	-	-	-	0.01
K_{71}	0.075	-	0.01	0.03	0.046
K_{12}	0.09~0.13	0.09	0.09	0.1	0.13
a_{NC}	0.25	-	0.23	0.1	0.4
SS_1	0.0004	-	-	-	50
σ_7	-	-	-	-	0.01
K_d	0.16~0.21	0.14	0.14	0.15	0.42
K_d	-	-	-	-	0.6
a_{OC}	2.6667	-	2.67	3.0	2.6
SOD	-	-	-	-	1.0

경강과 동진강에서 암모니아성 질소의 실측농도가 하류로 유하함에 따라 증가함을 보이는데 이를 반영하는 것으로 판단된다.

BOD 탈산소계수 K_d 는 0.42로 타 연구보다 비교적 많이 나타난 것은 BOD 분해가 잘 되고 있는 현상을 반영한 것으로 생각된다.

DO 재폭기계수인 K_a 는 0.6으로서 재폭기량이 상당히 많은 것으로 보정되었다. 탈산소계수와 재폭기계수를 가지고 새만금호의 자정계수 $f(K_a/K_d)$ 를 구해본 결과 1.43으로 산정되었다. 다른 호수 및 하천은 재폭기계수 자료가 부재하여 비교할 수 없었다. 그러나 상당히 양호한 결과를 보이기 때문에 다른 물리적 특성을 갖는 지역으로 판단된다.

4. 모형의 검증

4.1. 사용자료

모형의 검증은 1998년의 수질 자료를 사용하여 수행하였다. 그러나 봄철에는 관측자료의 부재로 수행하지 못하였고, 여름철과 가을철만 실시하였다. 검증을 위한 유량 및 유입수질 자료는 각각 Table 3 및 4에 정리된 바와 같다. 계산치와의 비교에 사용

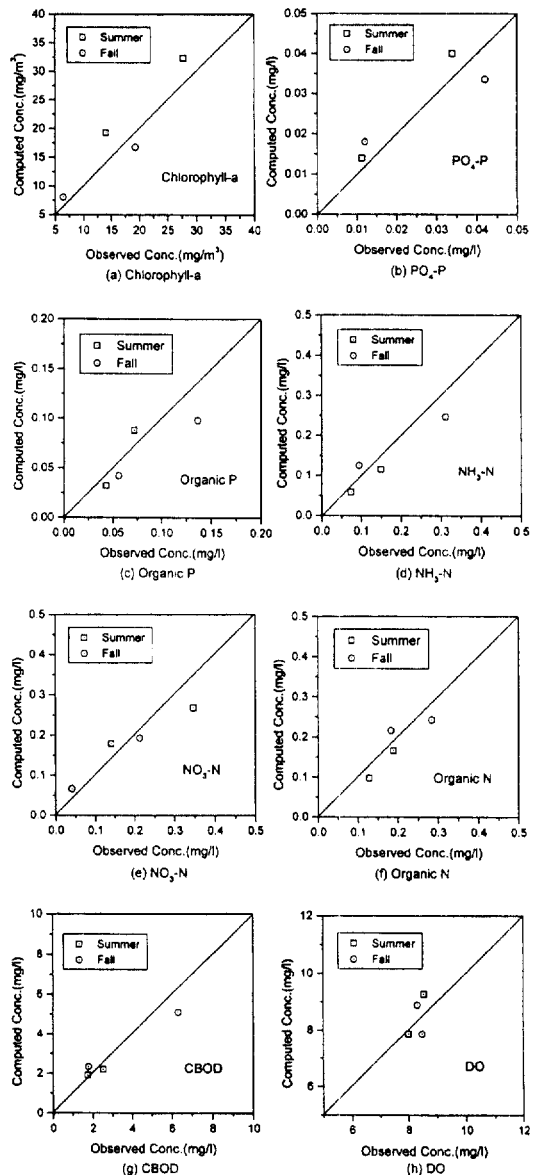


Fig. 4. Results of verification in the model.

된 지점은 V-1, V-2 지점이다(Fig. 1 참조)

4.2. 모형의 검증결과 및 분석

3장에서 기술한 바와 같이 계절별로 추정된 매개변수의 값들(Table 5 참조)을 사용하여 모형의 검증을 수행하였으며, 관측치와 계산치의 비교는 Fig. 4에 제시하였다. 검증지점의 부족으로 자료가 적지만 전반적으로 모형의 보정에서와 마찬가지로 만경강 유입수역 부근에서의 농도 계산치가 관측치와 비교적 큰 편차를 나타내는 경향을 보였다. 또한 각 수질 항목에 대하여 매 지점에서의 계산치가 관측치보다 일반적으로 크거나 작게 나타나는 경우가 많은데, 이는 모형의 보정에 사용된 자료군의 수가 충분하지 못하여 추정된 반응계수들의 자료 의존성이 강하게 나타나는 결과라 할 수 있다. 이러한 경향은 chlorophyll-a와 PO₄-P, DO의 경우에 두드러지게 나타나고 있다. 또한 DO는 다소 과대평가 되는 것으로 나타났다. 특히 비점오염원 수질항목간의 반응외적인 요소가 반응계수의 추정에 반영될 경우, 이러한 자료 의존성이 더욱 심하게 나타나게 된다. 따라서 보다 적절하고 신뢰성있는 변수추정 결과를 얻기 위해서는 비점오염원에 대한 정량적인 평가가 필요한 것으로 생각된다.

5. 결 론

WASP5 모형을 새만금호에 적용하여 모형의 매개변수의 추정 및 검증을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 봄철에는 Chlorophyll-a, NO₃-N이 과대평가되고 있고, NO₃-N는 관측치와 계산치의 편차가 큰 경향이 나타났다.
- 2) 유기인은 봄철과 여름철에, 유기질소는 봄철에 계산치들이 관측치들 보다 일반적으로 과소 추정되는 결과를 보이고 있다.
- 3) Chlorophyll-a, PO₄-P, DO는 계산치가 관측치보다 일반적으로 크거나 작게 나타나는 경우가 많은데, 이는 모형의 보정에 사용된 자료군의 수가 충분하지 못하여 추정된 반응계수들

의 자료 의존성이 강하게 나타나는 결과라 할 수 있다.

- 4) 모형에서 계산된 탈산소계수와 재폭기계수로 자정계수를 평가한 결과 1.43으로 나타났다.
- 5) 많은 수의 매개변수를 추정하는데 있어서 매개변수들을 관련된 수질항목별로 구분하여 순차적으로 추정함으로써 추정과정의 효율성을 높일 수 있었다.

본 연구를 통하여 장래수질을 예측하기 위해서는 다음의 연구가 뒤따라야 할 것이다.

- 1) 비점오염원이 수질모형에 반영되어야 할 것으로 생각된다.
- 2) 매개변수는 현장조사 등에 의한 정량적 평가에 의하여 공간적인 특성을 반영할 수 있도록 값이 주어짐이 바람직한 것으로 생각된다.
- 3) 갑문의 방류량에 따라 유속의 영향으로 수질 매개변수 특성이 달라지므로 수문조작의 기술이 검토되어야 한다.

사 사

이 논문은 1996~1998년도 학술진흥재단의 대학부설 연구소 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Orlob, G. T., *Mathematical Modeling of Water Quality: Streams, Lakes, and Reservoirs*, John Wiley & Sons, New York, NY, Chapter 9(1983).
2. Thomann, R. V., "Verification of water quality models," *J. Envir. Engrg. Div., ASCE*, **108**(EE5), 923~940(1982).
3. 최홍식, 이길성, "Streeter-Phelps 모델의 최적 계수 추정," *한국상하수도학회지*, **2**(1), 19~26(1989).
4. Wood, D. M., Houck, M. H. and Bell, J. M., "Automated calibration and use of

- stream-quality simulation model," *J., Envir., Engrg., ASCE*, **116**(2), 236~249(1990).
5. Morton, M., Stoddard, A. and Pagenkopf, J., "Eutrophication and nutrient enrichment in Peconic Bay: Numerical model of historical conditions of the mid-1970s," *Estuarine and Coastal Modeling: Proc. of the Estuarine & Coastal Circulation and Pollution Transport Model Data Comparison Specialty Conference*, ASCE, pp. 351~360(1990).
 6. Stoddard, A., Morton, M. and Pagenkopf, J., "Pre-and post-processing data management approach for eutrophication model of Peconic Bay, Long Island," *Estuarine and Coastal Modeling: Proc. of the Estuarine & Coastal Circulation and Pollution Transport Model Data Comparison Specialty Conference*, ASCE, pp. 341~350(1990).
 7. Ambrose, Jr., R. B., Wool, T. A., Connolly, J. P. and Schanz, R. W., WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model Theory, User's Manual, and Programmer's Guide, EPA/600/3-87/039, U.S. Envir. Protection Agency(1998).
 8. 황인성, 생태학적 모형을 이용한 팔당호의 수질 분석과 모형 감응도 분석, 서울대학교 대학원 석사학위논문(1991).
 9. 김원만 등, "팔당호 시험준설 영향조사 보고서," 환경처, 제7장(1990).
 10. 농림부 농어촌진흥공사, 새만금 담수호 수질보존대책수립조사연구(I) (1997. 12).
 11. 농림부 농어촌진흥공사, 새만금지구 간척종합개발사업 수문조사보고서 (1997. 12).
 12. 농어촌진흥공사 농어촌연구원, 새만금호의 내부오염부하량 산정 및 수질영향연구(1998. 12).
 13. 기상청, 기상연보(1988~1997).
 14. 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., Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling, (2nd Ed.), EPA/600/3-85/040, Tetra Tech(1985).
 15. Brown, L. C. and Barnwell, T. O., The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual, EPA/600/3-87/007, U.S. Envir. Protection Agency, Envir. Res. Lab., Athens, GA(1987).
 16. Thomann, R. V. and Mueller J. A., Principles of Surface Water Quality Modeling and Control, Harper & Row, New York(1987).
 17. Ambrose R. B. et al., WASP5 User's Guide Manual, EPA(1992).
 18. 유명진 외, "팔당호와 한강 하류에 대한 수질모형의 적용," 서울시정연구, 1(1), 4~24(1993).