

## WASP4 모형의 매개변수 추정

- 八堂湖를 중심으로 -

## Calibration of the WASP4 Model Applied to Lake Paldang

趙烘贊\* · 田庚秀\*\* · 李吉成\*\*\* · 韓光錫\*\*\*\*

Cho, Hong Yeon · Jun, Kyung Soo · Lee, Kil Seong · Han, Kwang Suk

## Abstract

Model parameters of the WASP4 applied to Lake Paldang 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. A water budget analysis using the monthly records of reservoir inflows and outflows in 1989 and 1990 was made to determine seasonally-averaged flowrates at model boundaries. Estimated flowrates were used, together with the seasonal average of water quality measurements in 1989 and 1990 for the calibration and verification, respectively, of the model. 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 and benthic sources of organic matters are essential. Benthic sources near the entrance of the Kyeongancheon were the most significant.

## 요 지

WASP4 모형을 八堂湖에 적용하여 모형의 매개변수 추정을 수행하였다. 추정방법으로는 수질항목 및 매개변수들을 몇개의 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. 1989년 및 1990년 월별 댐유입량 및 방류량 자료를 사용한 계절별 물수지 분석에 의하여 모형의 경계단에서의 유량 입력자료를 산정하여, 수질 측정자료의 계절별 평균치와 함께 계절별 매개변수의 추정 및 검증에 각각 사용하였다. 수질항목 및 관련 매개변수들을 계열별로 분류하여 추정하는 것이 많은 수의 매개변수 추정에 있어서 효율적인 방법임을 알 수 있었다. 모형의 보정 및 검증 결과, 유기물의 非點汚染源 및 底面溶出量에 대한 정량적 평가가 필요함을 알 수 있었다. 특히 慶安川 유입수역에서의 底面溶出量이 상당한 것으로 나타났다.

\* 서울대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 수료

\*\* 서울대학교 공과대학 토목공학과 연구원

\*\*\* 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\*\*\* 한국종합기술개발공사 상하수도부 상무

## 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 체류시간이 긴 호수에서는 하천으로부터 유입된 유기물 등이 상단기간 동안 누적되어, 藻類의 과다성장을 초래하고 산소를 고갈시켜 어류의 사멸, 수초의 번성 등을 야기하는, 이른바 富營養化 현상을 일으키곤 한다. 도시의 팽창과 산업의 발달, 농약 및 비료 사용의 급증은 자연상태에서 수십년이 걸리는 이러한 富營養化 과정을 불과 몇년으로 단축하게 되었다. 이렇듯 富營養化는 호소 수질오염의 가장 큰 문제이며, 따라서 湖沼 水質模型은 富營養化를 일으키는 질소, 인 등 營養鹽類의 화학적, 생물학적 반응구조와 이에 따른 富營養化 정도의 평가내지는 예측을 중심으로 발전되어 왔다. 초기에는 Vollenweider 모형으로부터 시작된, 인의 양으로부터 호수의 영양상태를 평가하는 인모형에 관한 연구가 활발하였으나, 현재에는 藻類, 질소, 인, BOD 및 DO 등 여러 수질항목들간의 상호반응을 포함하는 生態學的 水質模型(Eutrophication model)이 널리 개발되어 사용되고 있다.<sup>(1)</sup>

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 상대적인 중요성도 달라지게 된다.<sup>(2)</sup> 비교적 그 구조가 간단한 BOD 및 DO의 모의모형에 대해서는 최적화에 의한 매개변수의 추정방법도 연구, 개발되어 왔으나,<sup>(3,4)</sup> 모형의 구조가 복잡하고 그에 따라 추정할 매개변수가 많아질 경우에는 보통 시행착오법에 의존하여 모형을 보정하게 되어 많은 노력을 요하게 된다. 이 때에는 특정지역의 모형적용 경험에서 나오는 사전지식이나 사용자의 직관이 유용하게 사용되기도 한다. 본 연구에서는 湖沼 및 河口的 水質模型으로서 널리 사

용되고 있는<sup>(5,6)</sup> 生態學的 水質模型인 WASP4 모형<sup>(7)</sup>을 八堂湖에 적용하여, 모형의 보정과 검증을 수행하였다. 八堂湖는 광역상수도 취수지점들이 위치한 수도권의 주요 취수원으로서, 적정수질 확보에 관한 일반의 관심이 더욱 고조되고 있는 실정이다. WASP4 모형을 사용한 八堂湖 수질모델링에 관한 기존의 연구로서 黃仁性<sup>(8)</sup> 김원만 등<sup>(9)</sup>이 있으나, 매개변수 추정에 있어서 변수들간의 상대적 중요성에 관한 판단의 근거가 뒷받침된 기존의 연구가 거의 없는 상태이기 때문에, 본 연구에서는 가능한 많은 수의 매개변수를 추정 대상변수로 포함하되, 매개변수들을 관련된 수질항목의 종류에 따라 몇개의 군으로 나누어 추정함으로써 추정의 효율성을 높이고자 하였다. 본 연구는 장래수질의 계절별 모의과정의 한 단계로서 수행되었으며, 따라서 봄, 여름 및 가을의 계절에 대하여 계절별로 매개변수의 추정을 수행하였다.

## 2. 모형의 구성

### 2.1 WASP4 모형의 구조

WASP4 모형은 動水力學的 흐름모형인 DYNHYD 4 모형, 生態學的 水質模型(Eutrophication model)인 EUTRO4 모형 및 독성물질에 대한 수질 모의모형인 TOXI4 모형으로 구성된다. DYNHYD4 모형은 1차원 비정상 흐름에 대한 連續方程式 및 運動量方程式으로 구성되며 EUTRO4 모형 및 TOXI4 모형의 수행을 위한 수리학적 입력자료(수위, 유속, 유량 등)를 제공하는 모형이다. 수리학적 입력자료는 DYNHYD 4 모형에 의하지 않고 직접 입력하여 사용할 수도 있다. 본 연구에서는 DYNHYD4 모형에 의하여 흐름계산을 수행하고 그 결과를 입력자료로 사용하여 EUTRO4 모형에 의한 수질의 모의를 수행하였다.

EUTRO4 모형은 모의 수질항목의 종류 및 수질 반응모형에 따라 6개의 복잡도(표 1 참조)를 가지며 이 중 하나의 복잡도를 선택하여 그에 따른 수질 모의를 수행할 수 있다. 복잡도 4, 5 및 6은 藻類(phytoplankton 또는 chlorophyll a), 암모니아성 질소(NH<sub>3</sub>-N), 질산성 질소(NO<sub>3</sub>-N), 유기질소(Organic N), 인산염 인(PO<sub>4</sub>-P), 유기인(Organic P), 생화학적 산소요구량(CBOD), 용존 산소량(DO) 등 8개의 수

질항목을 모의하는데 이중 복잡도 4는 선형 반응 모형을 사용하며, 복잡도 5는 비선형 반응 및 탈질 산화 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 수질모형

EUTRO4 모형의 지배방정식은 흐름방향의 단면에 대하여 적분된 1차원 질량보존식으로 다음의 식으로서 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(AC_i)}{\partial t} + \frac{\partial(AuC_i)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( AE_x \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + AS_i, \quad i=1, 2, \dots, 8 \quad (1)$$

여기서 A는 구획경계의 단면적이며, u 및  $E_x$ 는 각각 흐름방향의 평균유속 및 擴散係數이다.  $C_i$ 는 각 수질항목(i)의 농도이며  $S_i$ 는 수질항목간의 반응, 침전, 底面溶出 등에 의한 농도변화율이다. 식 (1)의 첨자 i는 각 수질항목마다 주어지는 고유번호로서 각각의 i 값에 해당하는 수질항목은 표 1에 나타낸 바와 같다.  $E_x$ 는 유속 및 수심 등에 따라 변화하는 가변상수이나 EUTRO4 모형의 경우에는 일정한 값을 입력하도록 되어있다. 단, 경계조건의 시간변화가 없는 定常狀態의 수질계산에 있어서는  $E_x$ 값에 따른 수질계산 결과의 변화는 사실상 없게 된다.

본 연구에서 사용한 수질모형의 반응모식도는 그

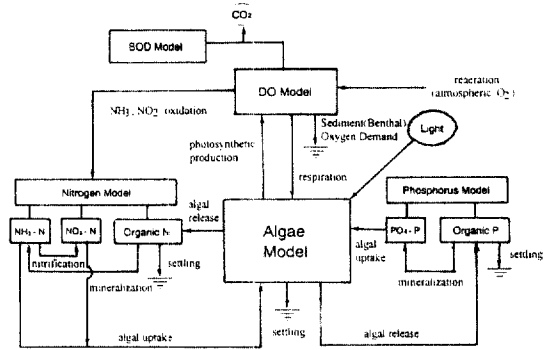


그림 1. EUTRO4 모형의 반응모식도

림 1과 같으며, 이들 수질항목의 모의를 위한 반응식들은 다음과 같다.

$$S_4 = (G_{p1} - D_{p1} - \frac{\sigma_4}{H})C_4 \quad (2)$$

$$S_8 = a_{pC}D_{p1}C_4 - k_{83}C_8 - \frac{\sigma_8}{H}C_8 \quad (3)$$

$$S_3 = k_{83}C_8 - a_{pC}G_{p1}C_4 + SS_3 \quad (4)$$

$$S_7 = a_{nC}D_{p1}C_4 - k_{71}C_7 - \frac{\sigma_7}{H}C_7 \quad (5)$$

$$S_1 = k_{71}C_7 - k_{12}C_1 - G_{p1}P_{NH_3}(a_{nC}C_4) + SS_1 \quad (6)$$

$$S_2 = k_{12}C_1 - (1 - P_{NH_3})a_{nC}G_{p1}C_4 \quad (7)$$

$$S_5 = k_{1D}a_{OC}C_4 - k_4C_5 \quad (8)$$

표 1. EUTRO4 모형의 복잡도와 모의수질항목

System Number	수 질 항 목	Use in Complexity Levels					
		1	2	3	4	5	6
1	Ammonia Nitrogen(NH <sub>3</sub> -N)		×	×	×	×	×
2	Nitrate Nitrogen(NO <sub>3</sub> -N)			×	×	×	×
3	Inorganic Phosphorus(PO <sub>4</sub> -P)				×	×	×
4	Phytoplankton(Chlorophylla-a)				×	×	×
5	Carbonaceous BOD(CBOB)	×	×	×	×	×	×
6	Dissolved Oxygen(DO)	×	×	×	×	×	×
7	Organic Nitrogen			×	×	×	×
8	Organic Phosphorus				×	×	×

$$S_6 = k_a(DO_{sat} - C_6) - k_d C_5 - \frac{64}{14} k_{12} C_1 \quad (9)$$

$$+ \left[ -\frac{32}{12} G_{p1} - k_{1R} a_{OC} + \frac{48}{14} a_{NC} G_{p1} (1 - P_{NH_3}) \right]$$

$$C_4 - \frac{SOD}{H}$$

여기서  $DO_{sat}$ 는 포화산소농도이며  $H$ 는 수심이다. 상기식들에 나타난 반응계수 중  $a_{NC}$ ,  $a_{PC}$  및  $a_{OC}$ 는 각각 탄소에 대한 질소, 인 및 산소의 비율이며,  $\sigma_i$ 는 수질항목  $i$ 에 해당하는 침전속도이다.  $k_{71}$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{83}$ ,  $k_d$  및  $k_a$ 는 각각 유기질소의 가수분해율,  $NH_3$ -N의 질산화율, 유기인의 가수분해율, 탈산소계수 및 재폭기계수이다.  $SS_1$ ,  $SS_3$  및  $SOD$ 는 각각 저면 퇴적물로부터의  $NH_3$ -N의 용출률,  $PO_4$ -P의 용출(또는 소멸)율 및 저면 수저생물군에 의한 산소소비율이다.

藻類의 成長率  $G_{p1}$ 은 일반적으로 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{p1} = G_{1max} G(I) \cdot G(N) \quad (10)$$

여기서  $G_{1max}$ 는 藻類의 最大成長率이며,  $G(I)$  및  $G(N)$ 은 각각 모형에 의하여 계산되는 빛 및 營養鹽類에 의한 藻類의 成長制限率이다.  $G(I)$ 는 광도( $I$ ), 수심, 광소멸계수( $K_w$ ) 등의 함수로서 Smith의 식으로부터 계산되며,  $G(N)$ 은 무기질소 및 무기인 농도의 함수로서 다음의 식으로부터 계산된다.

$$G(N) = \text{Min} \left( \frac{C_1 + C_2}{K_{mN} + C_1 + C_2}, \frac{C_3}{K_{mP} + C_3} \right) \quad (11)$$

여기서  $K_{mN}$  및  $K_{mP}$ 는 각각 질소 및 인의 반포화상수이다. 藻類의 消滅率  $D_{p2}$ 은 zooplankton의 영향을 무시하면 藻類의 내생 호흡률( $k_{1R}$ )과 사멸률( $k_{1D}$ )의 합과 같다. 또한  $P_{NH_3}$ 는  $NH_3$ -N 선회계수로서  $NH_3$ -N 및  $NO_3$ -N 농도의 함수로서 모형에 의하여 계산된다(Ambrose et al.<sup>(7)</sup> 참조).

반응계수들 중  $k_a$ ,  $k_d$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{71}$ ,  $k_{83}$ ,  $k_{1R}$  및  $G_{p1}$ 은 온도에 따라 변화하는 것들로서, 이하 본 논문에서 언급된 반응계수의 값들은 모두 20°C를 기준으로 한 것이다.

### 2.3 八堂湖 구획분할 및 지형 입력자료

DYNHYD4 및 EUTRO4 모형의 팔당호 적용에

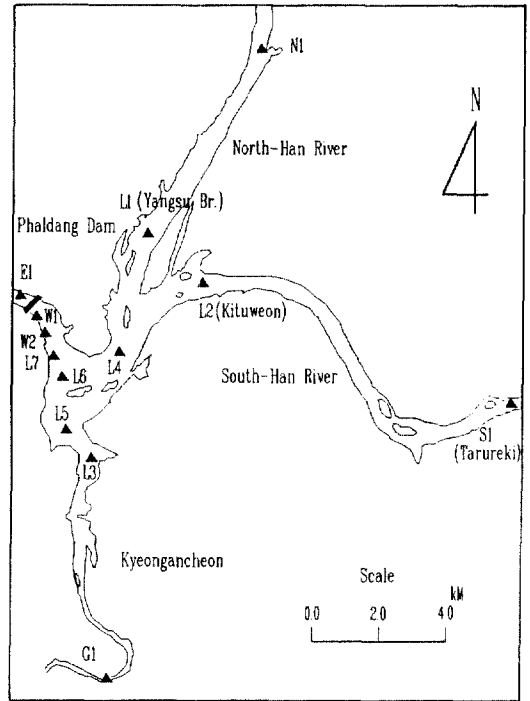


그림 2. 국립환경연구원 팔당호 수질측정지점

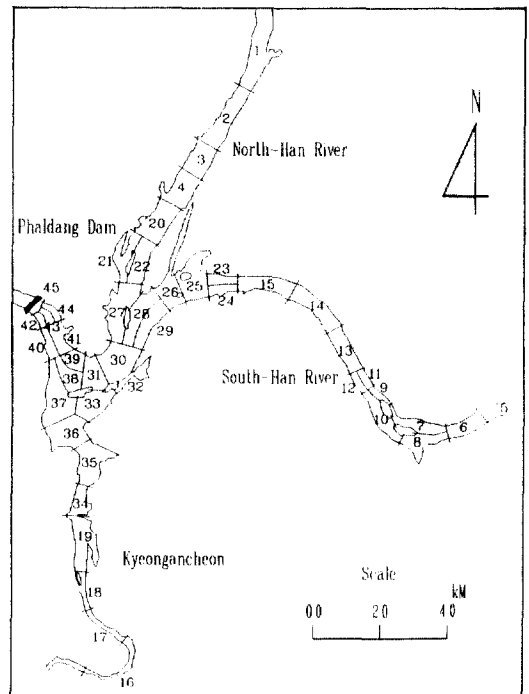


그림 3. 모형의 적용을 위한 팔당호 구획분할

있어서 상류단 경계는 北漢江 하류부의 문호 나루터 부근, 南漢江 하류부의 다루레기 나루터 부근 및 慶安川 하류부의 서하교 부근으로, 하류단 경계는 八堂댐으로 하여 모형을 구성하였다. 北漢江, 南漢江 및 慶安川 하류의 경계는 國立環境研究院<sup>(10,11,12)</sup>의 八堂湖 수질측정지점(그림 2) 중 N1, S1 및 G1 지점에 각각 해당한다. 이들 지점에서의 수질 측정자료는 모형의 보정(매개변수 추정)시 모형의 수질 경계조건으로 사용되며, 그림 2에 나타낸 L1, L2, ..., L7 지점에서의 수질자료는 계산치와의 비교에 사용된다.

이와같이 구성된 적용 대상지역의 구획분할은 國立環境研究院의 八堂湖 水質測定地點, 韓國綜合技術開發公社의 수질측정지점<sup>(13)</sup> 등을 사용하여 Thiesen 망도를 작성한 후, 섬의 위치 등 지형적인 영향을 고려하여 분할된 구획을 다소 수정함으로써 八堂湖를 45개의 구획으로 분할하였다. 구획분할 결과는 그림 3에 나타내었다. 이와같이 구획을 분할함으로써 모형의 보정에 사용될 수질자료의 측정 지점들이 구획의 중심점에 오도록 하였다. 분할된 각 구획의 평균 하상표고는 八堂湖 호분일람도<sup>(14)</sup> 및 기존에 측정된 하천단면 자료를 사용하여 산정하였으며, 각 구획의 표면적은 1:50,000 지형도상에서 구획계를 사용하여 측정하였다.

### 3. 모형의 보정

#### 3.1 사용자료

모형의 보정은 1989년의 유량 및 수질자료를 사용하여 계절별로 수행하였다. 사용된 자료는 3월 - 11월의 월별 유량 및 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, 8, 9월을 여름철로, 10, 11월을 가을철로 각각 구분하였다. 즉, 9월의 유량이 10월보다는 8월의 유량과 가까운 값을 보임을 감안하여 9월을 여름철로 구분하였다. 1989년의 8, 9 및 10월의 八堂湖 유입량은 각각 818, 725 및 321 m<sup>3</sup>/sec였다.

모형의 보정을 위한 유량 입력자료로서 상류단

경계인 北漢江, 南漢江 및 慶安川에서의 八堂湖 유입량, 하류단 경계인 팔당댐 방류량 및 八堂湖내에 위치한 수도권 광역상수도 취수지점에서의 취수량이 필요하다. 이들 값을 산정하기 위하여 1989년 3월 - 11월의 淸平댐 및 忠州 조정지댐 월별 방류량, 八堂댐 월별 유입량 및 방류량, 광역상수도 월별 취수량 자료<sup>(15)</sup>의 계절별 평균치에 대하여 다음과 같은 물수지 분석을 수행하였다. 먼저 八堂湖 총유입량에서 淸平댐 및 忠州 조정지댐 방류량을 감하였다. 이는 淸平댐하류 지천유입량, 忠州 조정지댐 하류 지천유입량 및 慶安川 유입량의 합이 되는데, 이를 점유유역 면적비로 배분하여 각각의 유입량을 구하였다. 이와같이 계산된 淸平댐 및 忠州 조정지댐의 하류 지천유입량에 각 댐의 방류량을 합하여 北漢江 및 南漢江으로부터의 八堂湖 유입량을 산정하였다. 이와같은 물수지분석 결과는 표 2에 요약하였다. 표 2에서 1990년 자료에 대한 물수지분석 또한 상술한 방법과 동일하며 그 결과는 모형의 검증(4장 참조)을 위한 유량 입력자료로 사용하였다. 또한 모형의 하류단 경계, 즉 八堂댐 수위값으로는 韓國電力公社<sup>(15)</sup>의 旬別 측정자료의 계절별 평균치를 사용하였다.

이와 같은 유량 및 수위자료를 경계조건으로 사용하여 수행된 DYNHYD4 모형에 의한 계산결과와 상세한 검증은 비교할 만한 관측자료의 부재로 수행하지 못하였다. 다만, 기존의 관측결과<sup>(14)</sup>와의 비교결과 流向 등 전체적인 흐름양상에 있어서는 대체적으로 일치하는 것으로 나타났다.

모형의 보정을 위한 상류단 경계(그림 2의 N1, S1 및 G1)에서의 유입수질 자료로는 國立環境研究院<sup>(11)</sup>의 1989년 월별 측정자료의 계절별 평균치를 사용하였다. 사용된 자료는 모형의 검증을 위한 유입수질 자료<sup>(12)</sup>와 함께 표 3에 정리하였다. 1990년 자료는 NO<sub>3</sub>-N이 결측되어 있으므로 1989년 자료를 이용하여 총질소에 대한 NO<sub>3</sub>-N의 비율을 각 지점별로 계산한 후, 1990년 관측된 총질소 농도에 지점별로 이 비율을 곱하여 NO<sub>3</sub>-N의 농도를 산정하였다. 하류단 경계인 八堂댐에서의 경계조건으로는 영의 농도경사를 사용하였다. 수온의 입력값으로는 八堂湖內的 수질 측정지점인 L1, L2, ..., L7 지점(그림 2 참조)에서의 수온 측정자료의 평균치를

표 2. 모형의 보정 및 검증용 위한 유량 입력자료

연 도	1989			1990		
	봄	여 름	가 을	봄	여 름	가 을
유 량(m <sup>3</sup> sec)						
청평댐 방류량	104.5	223.8	256.5	314.5	1148.3	93.0
청평댐하류 지천유입량*	1.0	22.9	12.8	9.4	46.8	5.7
충주댐 방류량	101.8	329.6	121.4	311.1	753.7	84.8
충주댐하류 지천유입량*	6.3	153.9	86.3	63.0	511.4	37.8
북한강 유입량*	105.5	246.7	269.3	323.9	1195.1	98.7
남한강 유입량*	108.1	483.5	207.7	374.1	1265.1	122.6
경안천 유입량*	1.0	23.7	13.3	9.7	78.8	5.9
팔당댐 총 유입량	214.6	753.9	490.3	707.7	2539.0	227.2
광역상수도 취수량*	33.6	38.2	38.3	40.7	41.8	41.5
팔당댐 방수량	181.0	715.3	449.0	667.5	2523.8	186.0

\* 물수지 분석에 의한 계산치

표 3. 모형의 보정 및 검증용 위한 수질 입력자료  
(a) 봄(4월-5월 평균수질)

수질항목	연도 경계지점	1989			1990		
		N1	S1	G1	N1	S1	G1
온 도(°C)		16.900	17.550	18.375	11.600	12.900	12.900
DO(mg/l)		11.500	12.000	9.900	10.650	10.350	9.850
총 질소(mg/l)		1.733	2.355	5.145	1.041	1.953	3.930
NH <sub>3</sub> -N(mg/l)		0.179	0.245	0.321	0.053	0.106	0.410
NO <sub>3</sub> -N(mg/l)		1.033	1.420	3.705	0.620	1.177	2.830
유기 질소(mg/l)		0.520	0.691	1.119	0.368	0.670	0.689
총 인(µg/l)		46.250	53.500	73.750	21.000	49.500	294.000
PO <sub>4</sub> -P(µg/l)		0.000	7.250	14.750	8.500	16.500	50.500
유기 인(µg/l)		46.250	46.250	59.000	12.500	33.000	243.500
엽록소(mg/m <sup>3</sup> )		7.675	8.750	43.675	7.400	3.800	16.800
CBOD <sub>5</sub> (mg/l)		1.250	1.700	2.900	0.800	1.200	1.750

자료에 대하여 일관적으로 나타나고 있고, 특히 유량이 비교적 적고 非點汚染源의 비중이 큰 봄철(4, 5월)에 그 차가 심하다. 따라서 부하량 C와 A(또는 B)의 불일치는 자료의 이상 때문이라기 보다는 본류로 직접 유입되는 非點汚染源에 의한 영향 때문인 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 주요 성과 및 결론을 요약하면 다음과 같다. 影響係數를 이용한 QUAL2E 反應係數의 최적추정 방법을 수립하여 충주댐부터 남한강수계 하류단까지의 하천구간에 적용하였다. 反應係數에 대한 수질요소들의 敏感度 分析을 실시하여 그 결과로서 11개의 추정 反應係數를 선정하였다. 이들 계수 중  $\sigma_1$ ,  $\mu_{max}$  및  $\rho$ 는 chl.a의 농도에 주로 영향을 미치며, 질소 순환요소들은  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  및  $\beta_3$ 에, 인 순환요소들은  $\beta_4$  및  $\sigma_3$ 에, BOD 및 DO는  $K_1$ ,  $K_3$  및  $K_4$ 에 각각 민감한 것으로 나타났다. 또한 총질소 및 총인의 反應係數에 대한 敏感度는 매우 작은 것으로 나타났다. 影響係數法에 의한 최적 추정방법은 계수들이 최적치에 빨리 수렴하도록 하는 유용한 방법임이 입증되었다. 모든 推定係數들이 3번 이내의 반복추정으로 최적치에 수렴하였다. 추정된 反應係數값들을 사용한 계산수질과 실측수질과의 비교결과, 질소 및 인 순환요소들에 대한 관측치가 계산치보다 큰 것으로 나타났는데, 이는 질소와 인의 비점오염부하량이 상당히 때문인 것으로 나타났다.

본 연구에서 사용된 影響係數를 이용한 反應係數 추정방안은 그 유용성이 입증되었으나, 실제 적용에 있어서 가용자료의 제한등으로 1년간의 측정자료만이 사용되었으며 측정되지 않은 수질항목에 대해서는 기존의 관측자료에 근거한 추정치를 사용하였다. 反應係數 추정을 위한 유량의 산정에 있어서도 본 연구에서 사용된 월별 댐유입량 및 방류량 자료뿐만 아니라 수계상의 여러 지점들에서의 유량자료가 가용하다면 더욱 정확한 지천유입량의 산정이 가능할 것이다. 따라서 본 연구에서 수립된 係數推定 방법의 효율적 적용을 위해서는 양질의 유량 및 수질자료의 데이터베이스 구축이 필요하리라 사료

된다. 또한 질소와 인에 대해서는 係數推定에 앞서 비점오염원에 대한 고려가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국종합기술개발공사의 재정적 지원에 의하여 수행되었으며 이에 사의를 표합니다.

#### 参 考 文 献

1. 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.
2. Smith D.J., *Water Quality for River-Reservoir Systems*, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 1978.
3. 金成淳, 李梁圭, 高康榮, "汚染된 河川의 水質豫測을 위한 數值模型에 관한 研究", *韓國上下水道學會誌*, 제4권, 제1호, 1990, pp. 50-62.
4. 심순보, 이광호, 유병로, "河川水質豫測 Model(I)", *韓國水文學會誌*, 제17권, 제1호, 1984, pp. 31-36.
5. 安泰弘, QUAL2E 模型을 利用한 漢江本流水質의 豫測.評價에 관한 研究, 서울大學校 環境大學院 碩士學位論文, 1988.
6. 이성기, 유태종, 강인숙, "영산호 수질예측에 관한 연구", *韓國上下水道學會誌*, 제6권, 제1호, 1993, pp. 15-24.
7. 崔興植, 李吉成, "QUAL II 模型의 錦江水系에의 適用", *韓國上下水道學會誌*, 제1권, 제2호, 1987, pp. 20-33.
8. 韓國建設技術研究院, 漢江 河川維持流量 調查研究, 韓國水資源公社, 1990.
9. Orlob, G.T., *Mathematical Modeling of Water Quality: Streams, Lakes, and Reservoirs*, John Wiley & Sons, New York, NY, 1983, pp. 433-459.
10. 최홍식, 이길성, "Streeter-Phelps 모델의 최적계수 추정", *韓國上下水道學會誌*, 제2권, 제1호, 1989, pp. 19-26.
11. Wood, D.M., Houck, M.H. and Bell, J.M., "Automated calibration and use of stream-quality simulation model", *J. Envir. Engrg.*, ASCE, Vol.116, No.2, 1990, pp. 236-249.
12. Becker, L. and Yeh, W.W-G., "Identification of

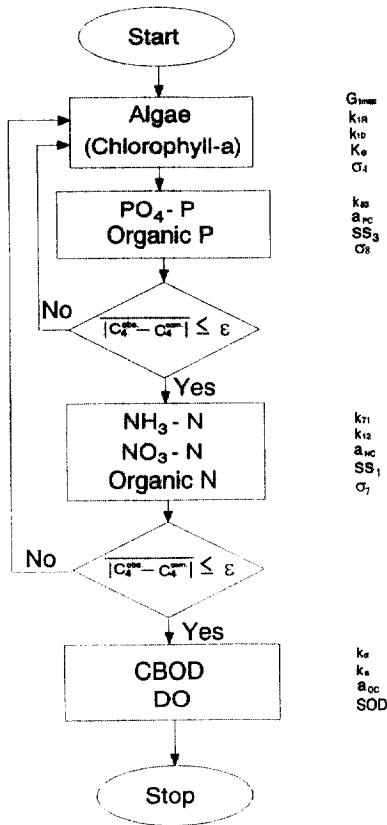


그림 4. 모형의 매개변수추정 흐름도

군과 관련된 매개변수들을 단계별로 추정하도록 하였다. 각 단계별 추정 매개변수와 추정에 사용되는 수질항목은 그림 4에 나타난 바와 같다. 제 1 단계에서는 수질항목들간 상호반응의 중심이 되는 藻類와 관련된 매개변수들인  $G_{1max}$ ,  $k_{1R}$ ,  $k_{1D}$ ,  $K_e$  및  $\sigma_4$ 를 순차적으로 추정하였다. 제 2 단계에서는 인 순환 요소들과 관련된  $k_{83}$ ,  $a_{PC}$ ,  $SS_{3r}$ , 및  $\sigma_8$ 을, 제 3 단계에서는 질소 순환요소들과 관련된  $k_{71}$ ,  $k_{12}$ ,  $a_{NC}$ ,  $SS_1$ , 및  $\sigma_7$ 을, 제 4 단계에서는 BOD 및 DO와 관련된 매개변수들인  $k_d$ ,  $k_a$ ,  $a_{OC}$ , 및 SOD를 각각 순차적으로 추정하도록 하였다. 또한 제 2단계 및 3 단계 추정 후에는 추정된 매개변수에 따른 藻類의 농도( $C_t$ )를 계산하여 7개 비교지점에 대하여 구한 계산치( $C_4^{com}$ )와 관측치( $C_4^{obs}$ )간 절대편차의 평균치가 어느 범위( $\epsilon$ ) 이하로 되지 않으면 제1단계부터 다시 반복하여 추정하도록 하였다.

각 단계에서의 추정방법으로는 매개변수의 값을

일정한 범위 내에서 변화시켜가며 그에 따른 수질 계산치와 관측치간의 절대편차의 합이 최소가 되도록 변수값을 정하는 시산법을 사용하였다. 각 매개변수값의 범위는 Ambrose et al.<sup>(7)</sup>, Bowie et al.<sup>(18)</sup>, Brown and Barnwell<sup>(19)</sup>, Thomann and Mueller<sup>(20)</sup> 및 김원만 등<sup>(9)</sup>의 문헌을 참조하여 표 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

1989년 자료(3.1절 참조)를 사용하여 계절별로 최종 추정된 매개변수값들은 표 5에 정리하였으며, 이 값들을 사용하여 산정된 각 수질항목별 계산치와 관측치의 비교는 그림 5에 나타내었다. 계산치와의 비교에 사용된 L1, L2, ..., L7 지점(그림 2 참조)에서의 수질 관측치들은 李吉成 등<sup>(21)</sup>에 상세히 정리되어 있다. 모형의 보정시 藻類 농도의 오차 허용범위  $\epsilon$ (그림 4 참조)은 0.01 mg/l로 하였다. 제 2 단계 추정 후 藻類의 농도 계산치와 실측치간의 절대편차 평균치가  $\epsilon$ 이상이어서 藻類 및 인순환요소들과 관련된 매개변수들은 2-3회의 반복에 의하여 추정되었으며, 그 밖의 매개변수들은 모두 한차례 추정으로 모형의 보정이 완료되었다. 모형의 보정 과정에서  $\sigma_4$ ,  $\sigma_7$  및  $\sigma_8$ 에 대한 수질항목들의 민감도는 다른 매개변수들에 대한 것보다 비교적 작은 것으로 나타났다.

그림 5에 나타난 모형의 보정결과중 몇 개의 수질항목의 경우에는(봄철의 예를 들면 chlorophyll a, Organic N,  $NO_3-N$ , CBOD 등) 관측치와 계산치와의 편차가 유난히 큰 特異點(outlier)이 나타나고 있는데, 이들은 주로 오염이 심한 慶安川 유입수역 부근 관측지점(그림 2의 L3 및 L5 지점)에 대한 비교결과로서 대부분의 경우 관측치가 계산치보다 큰 값을 보이고 있다. 이는 오염이 비교적 심하고 유속이



표 4. 모형의 보정에 사용된 매개변수값의 범위

매개변수	범위	하한치 (Lower Bound)	상한치 (Upper Bound)
$G_{1max}(1/day)$		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
$k_{s3}(1/day)$		0.00	0.22
$a_{PC}$		0.024	0.24
$SS_3(mg/m^2-day)$		—	—
$\sigma_8(m/day)$		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
$SS_1(mg/m^2-day)$		0.0	—
$\sigma_7(m/day)$		0.001	0.1
$k_c(1/day)$		0.004	4.24
$k_a(1/day)$		0.0	—
$a_{OC}$		—	2.67
$SOD(g/m^2-day)$		0.0	8.4

느린 慶安川의 유입수역 부근에 국지적으로 발달된 저면퇴적층에서의 용출에 의한 영향으로 판단된다. 따라서 이러한 영향을 고려하기 위해서는 모형 대상지역 내의 공간적인 특성을 반영할 수 있는 매개변수를 모형의 각 수질항목에 대하여 도입할 필요가 있을 것으로 사료된다.

봄철에는 南漢江 유입경계(그림 2의 S1 지점)에서의  $PO_4-P$  농도가 영이 아님에도 불구하고, 호수 내에서는 관측농도가 영으로 나타나, 소멸항(陰의  $SS_3$ )을 크게함으로써 모형을 보정하였다. 또한, DO 농도 관측치는 수온 관측치에 따른 포화산소농도

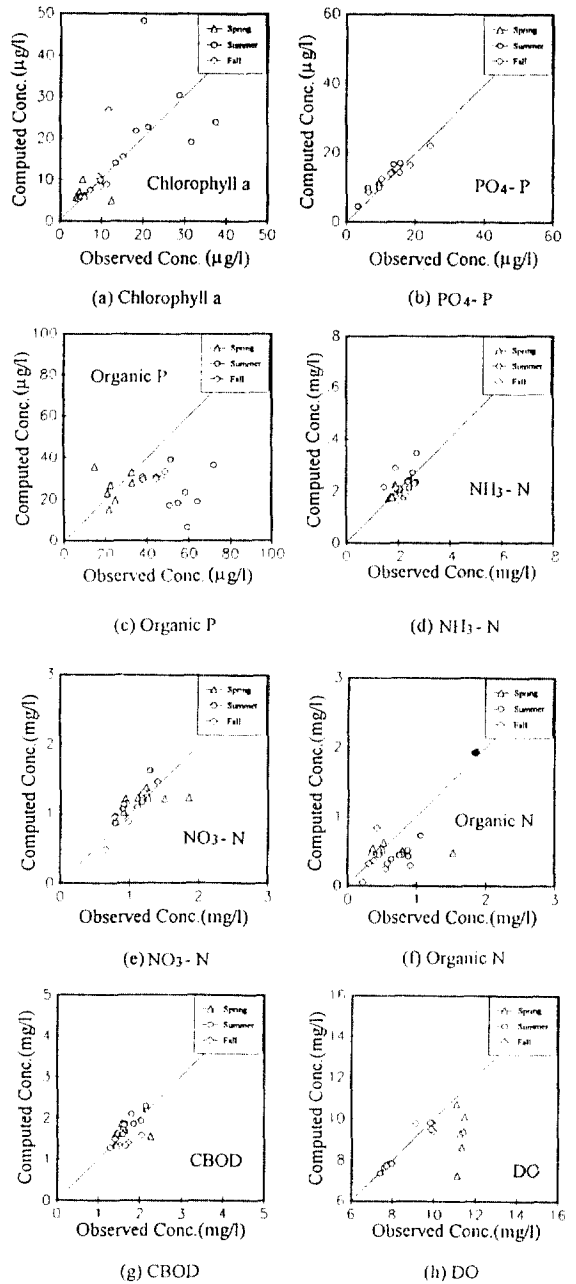


그림 5. 모형의 보정결과

( $DO_{sat}$ ) 값보다 큰 과포화 상태를 나타내고 있는데, 이를 보정하기 위해서는 藻類의 成長率( $G_{p1}$ )을 크게 해야한다(식 9 참조). 그러나,  $PO_4-P$ 의 농도를 관측치인 영이 되도록 보정할 경우 藻類成長率 또한 영으로 되기 때문에(식 10 및 11 참조) DO 농도를

표 5. 모형의 변수추정 결과

매개변수	계절		
	봄	여름	가을
$G_{1max}(1/day)$	2.0	2.0	2.0
$k_{1R}(1/day)$	0.05	0.15	0.15
$k_{1D}(1/day)$	0.00	0.10	0.10
$k_e(1/m)$	0.40, 0.80	0.40, 0.80	0.40, 0.80
$\sigma_4(m/day)$	0.1	0.3	0.2
$k_{83}(1/day)$	0.10	0.05	0.05
$a_{PC}$	0.20	0.20	0.20
$SS_3(mg/m^2-day)$	-30.00	-15.00	4.00
$\sigma_8(m/day)$	0.01	0.01	0.01
$k_{71}(1/day)$	0.01	0.01	0.10
$k_{12}(1/day)$	0.10	0.10	0.25
$a_{NC}$	0.40	0.40	0.40
$SS_1(mg/m^2-day)$	50.00	300.00	20.00
$\sigma_7(m/day)$	0.01	0.01	0.01
$k_d(1/day)$	0.025	0.05	0.02
$k_a(1/day)$	0.0	0.50	1.00
$a_{OC}$	2.60	2.60	2.60
$SOD(g/m^2-day)$	1.0	1.0	1.0

포화농도 이상이 되도록 보정할 수 없게 된다. 따라서 과포화된 DO에 대한 모형의 보정은 불가능하였다. 여름철과 가을철에는 유기질소 및 유기인의 계산치들이 관측치들보다 일관적으로 과소추정되는 결과를 보이고 있다. 이는 호수 등으로 인한 유량의 증가와 함께 호수경계를 통하여 유입되는 非點汚染源 또는 저면으로부터 용출되는 유기물의 영향 때문인 것으로 사료된다. 또한, 가을철에 대한 모형의 보정에서  $SS_3$ 의 추정치가 양의 값을 나타내고 있는데, 이는 저면퇴적물로부터의  $PO_4-P$  용출을 의미한다 하겠다. 이상의 결과를 살펴볼 때, 질소와 인 등의 유기물의 경우에는 반응계수 뿐만 아니라 저

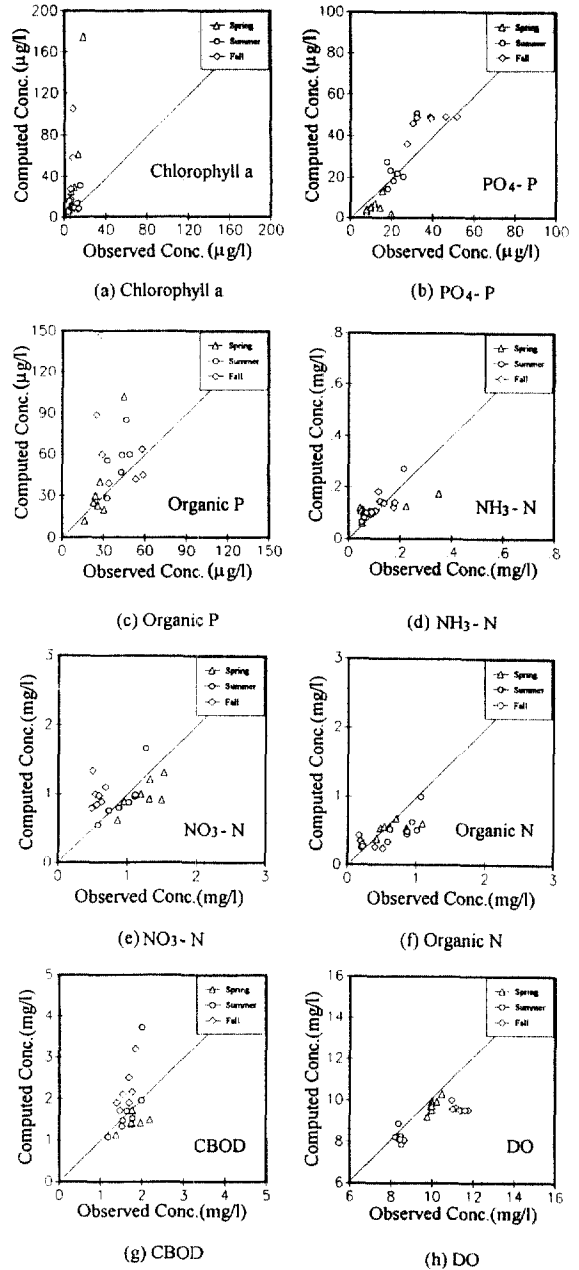


그림 6. 모형의 검증결과모형의 복잡도와 모의수질항목

면에서의 용출량이 수질계산에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 따라서 이러한 영향을 고려할 수 있는 매개변수들을 모형에 포함시켜야 할 것으로 사료된다.

## 4. 모형의 검증

### 4.1 사용자료

모형의 검증은 1990년의 유량 및 수질자료를 사용하여 수행하였다. 검증을 위한 유량 및 유입수질 자료는 각각 표 2 및 3에 정리된 바와 같다. 계산치와의 비교에 사용된 L1, L2, ..., L7 지점(그림 2 참조)에서의 수질 관측치들은 李吉成 등<sup>(21)</sup>에 상세히 정리되어 있다.

### 4.2 모형의 검증결과 및 분석

3장에서 기술한 바와 같이 계절별로 추정된 매개변수의 값들(표 5 참조)을 사용하여 모형의 검증을 수행하였으며, 관측치와 계산치의 비교는 그림 6에 제시하였다. 전반적으로, 모형의 보정에서와 마찬가지로 慶安川 유입수역 부근에서의 농도 계산치가 관측치와 비교적 큰 편차를 나타내는 경향을 보였다. 또한 각 수질항목에 대하여 매 지점에서의 계산치가 관측치보다 일관적으로 크거나 일관적으로 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 Organic P의 경우에 두드러지게 나타나고 있다. 특히 非點污染源 및 底面溶出量 등 수질항목간의 반응외적인 요소가 반응계수의 추정에 반영될 경우 이러한 자료 의존성이 더욱 심하게 나타나게 된다. 따라서 보다 적절하고 신뢰성있는 변수추정 결과를 얻기 위해서는 장기적인 양질의 자료구축도 중요하지만, 이와 더불어 非點污染源 및 底面溶出量 등에 대한 정량적인 평가가 필요한 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

WASP4 모형을 八堂湖에 적용하여 모형의 매개변수의 추정 및 검증을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 우선 많은 수의 매개변수를 추정하는데 있어서 매개변수들을 관련된 수질항목별로 구분하여 순차적으로 추정함으로써 추정과정의 효율성을 높일 수 있었다. 유기질소 및 유기인 등의 수질항목에 대한 非點污染源 또는 底面溶出量이 상

당한 것으로 나타났으며, 따라서 이들의 영향이 수질모형에 반영되어야 할 것으로 사료된다. 南·北 漢江 및 慶安川 이외의 모형경계를 통하여 유입되는 非點污染源의 경우에는 시간적, 공간적으로 그 양이 일정하지 않을 것이므로 적절한 非點污染源 모형을 이용한 정량적 평가에 의하여 WASP4 모형의 입력자료로서 주어짐이 바람직하다. 底面溶出의 경우 각 수질항목마다 이를 반영할 수 있는 매개변수의 도입이 필요할 것으로 사료된다. 저면퇴적층에서의 용출의 영향은 慶安川 유입수역 부근에서 특히 큰 것으로 나타났다. 따라서, 이러한 영향을 고려하기 위하여 도입된 매개변수는 일률적인 값을 갖도록 추정되기보다는, 현장조사 등에 의한 정량적 평가에 의하여 공간적인 특성을 반영할 수 있도록 값이 주어짐이 바람직한 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 '수도권 광역상수도 5단계 타당성조사 및 기본계획: 수질조사 및 평가과업'의 일환으로 수행되었으며, 연구수행에 재정적 지원 및 자료제공을 해주신 한국종합기술개발공사에 사의를 표합니다.

## 參 考 文 獻

1. Orlob, G.T., *Mathematical Modeling of Water Quality: Streams, Lakes, and Reservoirs*, John Wiley & Sons, New York, NY, 1983, Chapter 9.
2. Thomann R.V., "Verification of water quality models", *J. Envir. Engrg. Div.*, ASCE, Vol. 108, No. EE5, 1982, pp. 923-940.
3. 최홍식, 이길성, "Streeter-Phelps 모델의 최적계수 추정", *韓國上下水道學會誌*, 제2권, 제1호, 1989, pp. 19-26
4. Wood, D.M., Houck, M.H. and Bell, J.M., "Automated calibration and use of stream-quality simulation model", *J. Envir. Engrg.*, ASCE, Vol. 116, No. 2, 1990, pp. 236-249.
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, 1990, pp. 351-360.
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, 1990, pp. 341-350.
  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, 1988.
  8. 黃仁性, 生態學的 模型을 利用한 八堂湖의 水質分析과 模型의 感應度 分析, 서울大學校 大學院 碩士學位論文, 1991.
  9. 김원만 등, 八堂湖 試驗浚渫 影響調查 報告書, 環境處, 1990, 제7장.
  10. 國立環境研究院, 八堂 上水源 保護 綜合對策에 관한 研究(1次年度), 1988.
  11. 國立環境研究院, 八堂 上水源 保護 綜合對策에 관한 研究(2次年度), 1989.
  12. 國立環境研究院, 八堂 上水源 保護 綜合對策에 관한 研究(3次年度), 1990.
  13. 韓國綜合技術開發公社, 首都圈 廣域上水道 5段階 妥當性 調査 및 基本計劃 中間報告, 1992.(未出版)
  14. 李元煥 등, 八堂湖 浚渫 및 效率의 管理方案 調査 研究 報告書, 1992.
  15. 韓國電力公社, 水力發電所 運用資料集(1971-1990 實積), 發電處, 水力發電部, 1991.
  16. 氣象廳, 氣象年譜, 1989.
  17. 氣象廳, 氣象年譜, 1990.
  18. Bowie, G.L., Mills, W.B., Porcella, D.B., Campbell, C.L., Pagenkopf, J.R., Rupp, G.L., Jonhson, 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.
  19. Brown, L.C. and Barnwell, T.O., *The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL 2E-UNCAS: Documentation and User Manual*, EPA/600/3-87/007, U.S. Envir. Protection Agency, Envir. Res. Lab., Athens, GA, 1987.
  20. Thomann R.V. and Mueller J.A., *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper & Row, New York, 1987.
  21. 李吉成 등, 首都圈 廣域上水道 5 段階 妥當性調査 및 基本計劃: 八堂湖 水質調査 및 評價, 서울大學校 土木工學科 水工學研究室, 1993.

(接受: 1993. 7. 22)