# WASP4 모형의 매개변수 추정 및 검증
## - 팔당호를 중심으로 -
## Calibration and verification of WASP4 model in Lake Paldang

조 홍 연[1], 이 길 성[2], 한 광 석[3]
Cho Hong Yeon, Lee Kil Seong, Han Kwang Seok

1. 서론

湖沼汚染은 燐, 窒素 등과 같은 營養鹽類(nutrients)의 過度한 流入이 주 요인이며, 營養鹽類의 주 공급원은 산업 廢棄物 및 도시지역의 유기물 流出, 산림·경작지 및 골프장에서의 농약 및 비료에 의한 流出 등이다(OECD, 1972; Thomann and Mueller, 1987). 도시의 팽창과 산업의 발달, 농약 및 비료의 過多使用은 인근 하천유역 및 湖沼로의 過度한 營養鹽類 流入을 惹起하고, 藻類 성장에 필요한 양분을 충분히 공급하여 성장을 촉진하게 된다. 성장된 藻類는 저면 酸素枯渴, 濁度 증가, 취수여과지의 폐쇄, 惡臭 등의 汚染問題를 誘發한다(Bowie et al., 1985). 따라서, 湖沼水質模型은 富營養化와 營養鹽類의 관계규명 및 富營養化 정도의 豫測을 중심으로 화학적·생물학적 변화과정의 詳細하고 正確한 記述, 모의 水質項目의 확대에 중점을 두어 개발되어져 왔다. 湖沼 水質模型에서 고려되는 水質項目의 변화·반응과정을 模擬하는 模型은 藻類 模型, 窒素 模型, 燐 模型, BOD 模型, DO 模型 등의 副模型으로 구성되며, 고려하는 副模型과 副模型 내부의 反應過程 細分化 정도에 따라 模型이 구분된다.

본 연구에서는 湖沼 水質豫測模型 중 湖沼水質의 중심이 되는 藻類와 營養鹽類의 관계 및 BOD, DO 항목과의 관계를 模擬할 수 있는 WASP4 模型(Ambrose et al., 1988)을 팔당호에 적용하여, 모형의 보정 및 검증을 수행하고, 결과의 분석을 통한 모형적용의 타당성 파악을 주요 내용으로 한다.

2. WASP4 모형의 구조

2.1 모형의 복잡도 및 모의수질항목

WASP4 모형은 DYNHYD4 모형, EUTRO4 모형, TOXI4 모형으로 구성되며 DYNHYD4 모형은 EUTRO4 모형 및 TOXI4 모형의 수행을 위한 수리학적 입력자료(수위, 유속, 유량 등)를 제공하는 모형이다. 본 연구에서는 DYNHYD4 모형의 결과를 입력자료로 이용하고, EUTRO4 모형에 의한 수질항목의 모의만을 수행하였다. WASP4 모형은 副模型인 EUTRO4 模型을 이용하며, EUTRO4 模型은 6 종류의 複雜度(표 1 참조) 중 하나의 복잡도에 대하여 수행할 수 있다. 複雜度 4-6은 8 項目의 水質(phytoplankton, $NH_3$-N, $NO_3$-N, Organic-N, $PO_4$-P, Organic-P, BOD, DO)을 模擬할 수 있으며, 複雜度 5는 非線形 效果 및 脫窒酸化 過程을 포함하고, 複雜度 6은 水質項目과 水底生物群의 相互作用(benthos interaction)을 模擬할 수 있다. 본 연구에서는 資料의 가용성, 模型遂行의 難易度 등을 고려하여 複雜度 4에서 모형을 수행하였다. EUTRO4 모형의 지배방정식은 흐름방향의 단면적에 대하여 적분된 1차원 질량보존식으로 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial (AC_i)}{\partial t} + \frac{\partial (AuC_i)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(AE_x \frac{\partial C_i}{\partial x}\right) + AS_{L_i} + AS_{B_i} + AS_{K_i} \qquad (1)$$

여기서, $A$는 區劃境界의 단면적, $C_i$는 區劃의 $i$번째에 해당하는 수질항목의 농도, $u$ 및 $E_x$는 각각

1) 서울대학교 토목공학과 박사과정 수료
2) 서울대학교 토목공학과 교수
3) 한국종합기술개발공사 상하수도부 상무

흐름방향의 평균유속, 擴散係數이다. 그리고 $S_{L_i}$, $S_{B_i}$, $S_{K_i}$는 각각 區劃의 특정지역에 직접적으로 負荷되는 $i$번째에 해당되는 수질항목의 汚染負荷率[點汚染源] 또는 전지역에 균일하게 負荷되는 汚染負荷率[非點汚染源], 境界區劃에서의 汚染物 負荷率, 反應에 의한 변화율이다. 지배방정식의 기본형태는 식 (1)과 같으며, $S_{K_i}$를 수질항목별로 각각 다르게 구성하기 때문에 모의하고자 하는 수질항목의 갯수만큼 지배방정식이 구성되며, 각각의 수질항목에 해당되는 고유번호가 부여된다.

2.2 수질항목의 반응식

본 연구에서 수행하고자 하는 EUTRO4 模型의 반응항은 8개로 구성된다. 여기서, $S_{K_i}$는 $C_i$의 반응에 의한 변화율을 의미한다. 본 모형의 경우 $C_1$, $C_2$, $C_3$, $C_4$, $C_5$, $C_6$, $C_7$, $C_8$은 각각 암모니아성 질소($NH_3$-N), 질산성 질소($NO_3$-N), 인산염 인($PO_4$-P), 조류(엽록소-a), BOD, DO, 유기 질소 및 유기 인의 농도(mg/l)이다.

$$S_{k4} = (G_{p1} - D_{p1} - \frac{\sigma_4}{H}) C_4 \tag{2}$$

$$S_{k8} = a_{PC} D_{p1} C_4 - k_{83}\theta_{83}^{(T-20)} C_8 - \frac{\sigma_8}{H}(1-f_{D8})C_8 \tag{3}$$

$$S_{k3} = k_{83}\theta_{83}^{(T-20)} C_3 - a_{PC} G_{p1} C_4 - \frac{\sigma_3}{H}(1-f_{D3})C_3 + SS_3 \tag{4}$$

$$S_{k7} = a_{NC} D_{p1} C_4 - k_{71}\theta_{71}^{(T-20)} C_7 - \frac{\sigma_7}{H}(1-f_{D7})C_7 \tag{5}$$

$$S_{k1} = k_{71}\theta_{71}^{(T-20)} C_7 - k_{12}\theta_{12}^{(T-20)} C_1 - G_{p1} P_{NH_3}(a_{NC} C_4) + SS_1 \tag{6}$$

$$S_{k2} = k_{12}\theta_{12}^{(T-20)} C_1 - (1-P_{NH_3}) a_{NC} G_{p1} C_4 \tag{7}$$

$$S_{k5} = k_{1D} a_{OC} C_4 - k_d \theta_d^{(T-20)} C_5 - \frac{\sigma_5}{H}(1-f_{D5})C_5 \tag{8}$$

$$S_{k6} = k_a \theta_a^{(T-20)}(DO_{sat} - C_6) - k_d \theta_d^{(T-20)} C_6 - \frac{64}{14} k_{12} \theta_{12}^{(T-20)} C_1 - \left[k_{1R}\theta_{1R}^{(T-20)} a_{OC} + \frac{32}{14} G_{p1} + \frac{48}{14} a_{NC} G_{p1}(1-P_{NH_3})\right] C_4 - \frac{SOD}{H} \tag{9}$$

여기서, $H$는 수심(m), $T$는 온도(℃)이다. $G_{p1}$은 조류성장률( $= G_{1\max}\theta_1^{(T-20)} G(I) \cdot G(N)$, $G_{1\max}$는 조류의 최대 성장률(1/day), $\theta_1$은 온도보정계수, $G(I)$, $G(N)$은 각각 모형내부에서 계산되는 빛에 의한 조류성장 제한인자, 영양염류에 의한 조류성장 제한인자)이다. $D_{p1}$은 조류 소멸률( $= k_{1R}\theta_{1R}^{(T-20)} + k_{1D}$, $k_{1R}$은 조류의 내생 호흡률(1/day), $\theta_{1R}$은 온도보정계수, $k_{1D}$는 조류의 사멸률(1/day))이다. $a_{NC}$, $a_{PC}$, $a_{OC}$는 각각 탄소에 대한 질소, 인, 산소의 비율이며, $\sigma_i$ 및 $f_{Di}$는 각각 수질항목 $i$에 해당하는 침전속도(m/day) 및 용존율이다. $k_{71}$, $k_{12}$, $k_{83}$, $k_d$, $k_a$는 각각 유기질소의 가수분해율(1/day), 암모니아성 질소의 질산화율(1/day), 유기인의 가수분해율(1/day), 탈산소계수(1/day), 재폭기계수(1/day)이며, 각각의 계수에 해당되는 온도보정계수는 $\theta_{71}$, $\theta_{12}$, $\theta_{83}$, $\theta_d$, $\theta_a$이다. $SS_1$, $SS_3$, $SOD$는 각각 저면퇴적물로 부터의 암모니아성 질소의 용출율($g/m^3$-day), 인산염 인의 용출율($g/m^3$-day), 저면 수저생물군에 의한 산소소비율($g/m^2$-day)이다. 또한, $DO_{sat}$ 및 $P_{NH_3}$는 각각 포화 용존산소량(mg/l), 암모니아성 질소 선호계수로 계산식은 다음과 같으며, $T_a$는 절대온도로 표현되는 수온, $K_{mN}$은 질소의 반포화상수(mg/l)이다.

$$DO_{sat} = \exp[-139.3441 + (1.575701 \cdot 10^5 T_a^{-1}) - (6.642308 \cdot 10^7 T_a^{-2}) + (1.243800 \cdot 10^{10} T_a^{-3}) - (8.621949 \cdot 10^{11} T_a^{-4})]$$

$$P_{NH_3} = \left[C_1 \frac{C_2}{(K_{mN}+C_1)(K_{mN}+C_2)} + C_1 \frac{K_{mN}}{(C_1+C_2)(K_{mN}+C_2)}\right]$$

3. 팔당호 구획분할 및 지형 입력자료

DYNHYD4 模型, EUTRO4 模型의 境界 및 區劃分割은 EUTRO4 模型을 수행하는 DYNHYD4 模型의 흐름 입력자료를 사용하므로 두 模型이 一致하여야 한다. 본 연구에서는 팔당湖의 取水地點 및 주요 측정지점(국립환경연구원(NIER)의 八堂湖 水質測定地點, 한국종합개발공사(KECC)의 水質測定地點: 그림 1 참조)을 포함하고, 妥當한 境界條件의 입력이 가능한 지점으로 模型의 境界를 결정하였다. 본 연구에서 수행하는 DYNHYD4 模型, EUTRO4 模型의 경우는 상류단 境界 3개 지

점(북한강 境界:북한강 문호나루터 부근 N1 지점, 남한강 境界:남한강 다루레기 나루터 부근 S1 지점, 경안천 境界:경안천 서하교 부근 G1 지점)과 하류단 境界 1개 지점(팔당댐)으로 구성된다.

상·하류단의 境界를 결정한 후, 境界 내부의 區劃分割은 NIER 및 KECC 水質測定地點 중 境界內의 측정지점 만을 고려하여 Thiessen 網圖를 작성한 후, 섬의 위치 등 지형적인 影響과 흐름의 유사성을 고려하여 分割된 區劃을 개선, 수정함으로써 八堂湖를 45개의 區劃으로 分割하였다(그림 2 참조). 分割된 區劃의 평균 하상표고(기준표고:평균해수면)는 팔당호 호분일람도 및 기존에 측정된 하천단면 자료를 사용하여 계산하였으며, 區劃의 表面積은 1:50,000 지형도상에서 구적계를 사용하여 측정하였다.

## 4. 모형의 보정(매개변수 추정)

### 4.1 模型의 入力資料

DYNHYD4 模型의 入力資料는 상류단 경계인 북한강, 남한강, 경안천 유입량이며, 지천유입량을 유역면적비로 분할하여 계산한 후, 물수지 분석에 의한 방법으로 계산하였다. 또한, 광역상수도 취수량 및 팔당댐 수위는 한국전력공사, 發電處(1991) 資料를 직접 사용하였다. EUTRO4 模型의 水質 入力資料는 NIER(1989) 資料를 사용하였다.

### 4.2 모형수행의 기본가정

본 모형을 팔당호에 적용하는 과정에서 지형·기상적 특성 및 자료 가용성 등을 고려하여 가정한 내용은 다음과 같다. 팔당호의 평균풍속은 1.0-2.0(m/sec) 범위로 바람에 의한 팔당호 흐름장의 영향은 무시하였으며, 수온은 팔당호내의 공간적 온도격차가 크지 않으므로 팔당호내 7개지점(L1-L7 지점)의 평균 수온을 사용하였다. 또한, $SOD$=1.0(g/m$^2$-day)의 값을 사용하였다. 또한 침전항과 관련된 계수중 조류의 침강속도는 $\sigma_4$=0.2(m/day)의 값을 입력하였으며, 인산염인 및 BOD에 의한 침전항은 무시하였다. 유기 인 및 유기 질소의 침전항은 QUAL2E 모형(Brown and Barnwell,1987)에서 제시하는 범위의 중간 정도(order)인 0.01(m/day/m) 값을 입력하였다. 따라서, 본 모형에서 모의하는 수질항목간의 反應模式圖는 그림 3과 같다. 영양염류의 용출 및 침전량은 측정이 어렵기 때문에 模型의 補正을 통하여 그 값을 결정(Thomann and Mueller,1987; Bowie et al.,1985)하기도 한다. 본 연구에서는 모형의 보정과정에서 영양염류의 용출을 고려하였다.

### 4.3 추정 입력계수의 선정

入力 反應常數 중 溫度 補正係數는 문헌(Thomann and Mueller(Text),1987; Bowie et al.(Report),1985; Ambrose et al.(WASP4),1988; Brown and Barnwell(QUAL2E),1987)을 참고하여 다음 표와 같이 결정하였다. 재폭기계수의 溫度 補正係數는 模型 고유의 값 1.028을 사용하였다.

| 온도 보정계수 | QUAL2E | WASP4 | Text | Report | 선 택 |
|---|---|---|---|---|---|
| $\theta_{1R}$ | 1.047 | 1.045 | 1.080 | -- | 1.045 |
| $\theta_d$ | 1.047 | 1.047 | 1.047 | -- | 1.047 |
| $\theta_{12}$ | 1.083 | 1.080 | 1.080 | 1.080 | 1.080 |
| $\theta_{71}$ | 1.047 | 1.080 | -- | 1.080 | 1.047 |
| $\theta_{83}$ | 1.047 | 1.080 | -- | 1.080 | 1.047 |
| $\theta_1$ | 1.047 | 1.068 | 1.066 | 1.072 | 1.072 |

模型수행의 기본가정, 관측치 入力, 溫度 補正係數의 선택을 통하여 제외되지 않은 入力係數는 모두 變數推定 媒介變數로 선정하였으며, 최종 선정된 補正 媒介變數는 $G_{1max}$, $k_{71}$, $k_{12}$, $k_{83}$, $k_{1D}$, $k_d$, $k_a$, $k_{1R}$, $a_{NC}$, $a_{PC}$, $a_{OC}$, $K_e$, $SS_1$, $SS_3$로 총 14개가 된다.

### 4.4 媒介變數의 推定過程

최종적으로 선정된 推定 媒介變數 14개를 대상으로 模型의 補正을 수행하며, 補正을 위한 變數 推定過程은 총 5단계로 구분된다. 각각의 단계는 최적 媒介變數가 얻어질 때 까지 반복 수행된다. 관련 水質項目別로 부분적인 變數推定이 1차로 수행된 후, 전체적인 模型의 變數推定이 진행되며, 최적 媒介變數의 推定을 위하여 반복 수행한다. 보고서 및 문헌(표 2 참조)을 참조한

推定 매개변수의 상한치, 하한치를 제약조건으로 하여 최적변수를 추정하였다.

제 1 단계 : 環境 媒介變數( $K_e$, $SS_1$, $SS_3$) 값의 임시고정

제 2 단계 : 藻類濃度와 관련된 媒介變數 $G_{1max}$, $k_{1R}$, $k_{1D}$값을 推定

$k_{1D}$, $k_{1R}$ 값을 고정(각각 0.05, 0.15day$^{-1}$)하고, 절대편차의 합이 최소가 되는 $G_{1max}$를 推定. 결정된 $G_{1max}$의 값이 1.5-2.5day$^{-1}$를 벗어날 경우 $k_{1D}$ 및 $k_{1R}$을 조정하여 $G_{1max}$를 補正한다. $G_{1max}$, $k_{1R}$가 모두 문헌에서 제시한 범위를 벗어난 경우 광소멸계수 $K_e$( $K_e$>0.0)를 조정(1단계로 복귀)한 후 $G_{1max}$, $k_{1R}$를 결정한다.

제 3 단계 : 인(유기 인, 인산염 인) 濃度와 관련된 媒介變數 $k_{83}$, $a_{PC}$ 값을 推定

$a_{PC}$를 고정(0.04)하고, 유기 인, 인산염 인 濃度의 절대오차의 합이 최소가 되는 $k_{83}$를 推定한다. $k_{83}$ 및 $a_{PC}$를 이용하여 적절한 수준의 變數의 推定이 불가능한 경우 $SS_3$(1단계로 복귀)를 이용하여 補正한다.

제 4 단계 : 질소($NH_3$-N, $NO_3$-N, 유기 질소) 濃度와 관련된 媒介變數 $k_{71}$, $k_{12}$, $a_{NC}$를 推定

$k_{12}$를 0.3day$^{-1}$로 고정, $a_{NC}$=0.4로 고정하고, $NH_3$-N, $NO_3$-N, 유기 질소 濃度의 절대오차의 합이 최소가 되는 $k_{71}$를 推定한다. $k_{71}$, $k_{12}$, $a_{NC}$를 이용하여 變數의 推定이 불가능한 경우는 1단계로 복귀하여 $SS_1$을 이용하여 變數補正을 재수행한다.

제 5 단계 : BOD, DO 濃度와 관련된 媒介變數 $k_d$, $k_a$, $a_{OC}$를 推定

BOD 濃度의 절대편차의 합이 최소가 되는 $k_d$를 推定, 결정된 $k_d$를 사용하여 DO 濃度 절대편차의 합을 최소로 하는 $k_a$ 및 $a_{OC}$를 推定한다. DO 濃度의 補正은 우선 $a_{OC}$=2.6으로 고정하고, $k_a$를 推定하는 방법을 이용한다. 지역적으로 DO 濃度가 특이한 지역은 $SOD$값을 이용하여 變數의 推定을 수행한다.

### 4.5 模型의 補正結果 및 分析

1989년 NIER 資料를 3등분(봄:4-5월, 여름:6-9월, 가을:10-11월)하여 계절별로 模型(계절별 평균자료를 사용)을 補正(變數推定)하였다. 계절별로 최종추정된 변수는 표 3에 제시하였으며, 추정변수에 의한 계절별 보정결과는 각 수질항목별로 관측치와 보정된 계산치를 圖示하여 그림 4(여름)에 제시하였다. 표 3에 제시된 추정결과 중, 봄철의 모형 보정과정에서 최종 추정된 변수 $k_{1D}$=0.0, $k_{1R}$=0.05는 추정변수의 하한치이며, 조류성장이 영양염류의 제한으로 인하여 억제(조류의 성장률은 영)되기 때문에 조류의 소멸률도 최소에 도달하고 있는 것으로 판단된다. 또한, $SS_3$의 값이 가을철에 양수(+)가 되는 것은 인산염인의 용출 및 유입이 가을철에 발생하고 있음을 의미하며, 이는 저면퇴적물에 의한 용출로 판단된다. 또한, 圖示된 결과 중 특이점(outlier)이 圖示된 항목(봄철 유기 질소, DO, 엽록소-a; 가을철 엽록소-a 등)은 주로 오염이 심한 경안천 유입수역 부근의 영향으로 판단되며, 경안천 오염물의 확산정도에 따라 그 범위가 확장·축소되기도 한다.

봄철에는 남한강에서의 인산염 인의 유입에도 불구하고, 호수내에서는 전혀 검출되지 않았으므로, 소멸항을 크게하여 모형을 보정하였으며, 이러한 과정으로 인하여 조류의 성장이 차단되고 조류의 사멸률도 하한치에 도달하게 된다. 이러한 조류성장의 제한으로, DO 농도는 과소추정되었으며, BOD는 과대추정되는 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 봄철의 모형보정은 인산염인이 전혀 검출되지 않은 상황, DO 농도가 과포화된 상황(일반적으로 영양염류의 충분한 공급으로 인하여 조류가 많이 성장하고, 성장된 조류의 활발한 광합성 작용으로 인하여 DO 농도가 과포화됨)의 상반적 특성으로 인하여 EUTRO4 모형의 구조로는 보정상 어려움이 있는 것으로 판단된다. 여름철(그림 4 참조)에는 영양염류의 공급으로 조류의 성장이 활발하며, 유기 질소 및 유기 인이 과소추정되는 결과를 보이고 있다. 유기 질소 및 유기 인이 과소추정된 이유는 여름철 홍수 및 호우로 인한 지표면 유출을 통하여 토사, 농약 및 비료에 의한 각종 유기물이 이 시기에 유입되는 것으로 판단된다. 가을철은 여름철과 정도차이는 있으나 동일한 경향의 보정결과를 보이고 있음을 알 수 있으며, 유기물의 과소평가는 비점오염원 및 저면퇴적물에 의한 용출로 판단된다.

## 5. 模型의 檢證

### 5.1 模型의 入力資料

본 연구에서는 1989년의 유량 및 水質資料를 이용하여 模型의 매개변수를 추정하였으며, 可用한 1990년의 유량 및 水質資料를 사용하여 模型의 檢證을 遂行하였다. 檢證結果의 통계적 분석

은 遂行하지 않았으며, 관측치와 계산치와의 圖示를 통한 정성적인 경향분석만을 遂行하였다. 模型의 檢證過程은 매개변수 推定過程을 제외하면 模型의 補正과 동일한 절차를 밟게 된다.

檢證을 위한 流量 入力資料는 팔당호의 물수지 分析過程을 통하여 얻어진 1990년 유입유량 및 취수량 資料를 사용하였다. 또한 水位資料는 1990년의 한국전력공사, 발전처(1991) 觀測資料를 사용하였다. 경계단에서의 수질항목별 濃度 및 檢證過程에서 비교될 팔당호내 7개 지점의 濃度資料는 1990년 NIER(1990) 測定資料를 사용하였다. 그러나 1990년 資料는 模型遂行時 필요한 $NO_3$-N 항목이 缺測되어 있으므로 1989년 NIER 총 질소 資料를 이용하여 다음과 같은 방법으로 산정하였다. 총 질소에 대한 $NO_3$-N 의 비율(1989년 비율)을 각 지점별로 계산하여 1990년 관측된 총 질소 濃度에 지점별로 산정된 ($NO_3$-N)/(총 질소) 값을 곱하여 계산하였다.

5.2 模型의 檢證結果 및 分析

표 3의 계절별 추정 매개변수를 사용하여 模型의 檢證을 遂行하였으며, 관측치와 계산치를 1:1 축상에 圖示하여 그림 5(여름)에 제시하였다. 전반적으로, 模型의 補正過程에서 異常點으로 나타난 경안천 유입수역 부근의 濃度는 檢證過程에서도 동일한 경향을 반영하고 있으며, 오염이 심한 경안천 유역의 異常點 處理를 위해서는 경안천 유입수역의 국지적인 濃度變化 分析 및 확산 분석이 필요하나 可用資料의 부재로 遂行하지 못하였다.

봄철의 검증결과는 엽록소-a를 과대평가하고 있는 반면, 인산염 인은 과소평가하고 있는 相反된 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 봄철 인 계열 및 엽록소-a를 예측하는 模型의 구조 및 資料의 특수성에 기인하는 것으로 판단된다. 질소 계열 및 유기 인의 檢證結果는 $NO_3$-N이 약간 과소평가되는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 BOD 는 약간 과소평가되고, DO는 적절하게 평가되고 있다. 模型의 補正過程에서 과소평가된 DO가 적절하게 평가되는 이유는 엽록소-a의 활발한 성장 및 BOD의 과소평가 때문으로 판단된다. 여름철의 검증결과(그림 5 참조)는 유기물, 즉 유기 인 및 유기 질소의 과소평가 및 과대평가가 두드러진 경향으로 보여지고 있음을 알 수 있다. 유기물의 과대·과소평가가 예측되는 이유는 여름철 강우에 의한 비점오염원의 유입으로 판단되며, 非點汚染源의 定量的 評價의 중요성을 시사한다 할 수 있다. 가을철의 검증결과도 봄철과 같이 엽록소-a가 과대평가되고 있는데, 이는 봄철과는 달리 인산염 인의 과대평가에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 $NO_3$-N이 과대평가되는 것은 총 질소에 대한 $NO_3$-N의 지점별 비율에 따른 획일적 分配에 따른 영향으로 판단되며, 보다 많은 資料에 의한 적절한 비율의 산정 또는 $NO_3$-N 항목의 추가측정 등이 필요하다. 유기 인이 과대평가된 것은 補正過程에서 제시된 非點汚染源 및 저면에서의 영양염류 용출에 의한 濃度上昇이 크게 나타난 것으로 판단되며, BOD는 과대평가되고, DO는 과소평가되고 있다.

전반적으로 많은 資料(4개월간의 資料)를 사용한 여름철은 비점오염원의 영향으로 판단되는 유기 질소 및 유기 인의 평가에 중요성이 제시되는 반면, 봄·가을철은 엽록소-a의 예측 및 관련 수질항목($PO_4$-P, $NO_3$-N 등)의 예측에 문제점이 있는 것으로 판단된다. 이는 資料의 수가 부족하기 때문에 한 시점의 資料가 전체 계절을 대표(예를 들면, 봄철의 경우 3월, 4월 資料가 缺測될 경우 5월이 봄철을 대표)하는데 문제점이 있는 것으로 판단된다.

6. 결론 및 향후 연구과제.

본 연구에서 얻어진 주요 결론은 다음과 같다. WASP4 모형을 팔당호에 적용하여 모형의 보정(매개변수의 추정), 검증을 수행한 결과 유기 질소 및 유기 인 항목의 경우 비점오염원의 영향에 대한 정량적인 분석이 필요하다고 판단된다. 또한, 매개변수의 추정시 수질항목을 계열별로 분류하여 추정하는 것이 효율적이며, 국지적인 보정은 환경매개변수를 이용하여 보정하는 것이 타당하다고 판단된다. 계절별로 수행된 변수추정 결과 1989년 봄철의 자료는 본 모형의 구조상으로는 추정이 불가능하다. 모형 구조의 개선 또는 자료의 신뢰성에 대한 제고가 필요하다고 판단된다.

본 연구에서 수행하지 못한 내용 및 향후 연구과제는 자료구축 및 모형의 보완 부분으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 각각 1년간의 자료를 이용하여 모형의 보정 및 검증을 수행하였기 때문에 특정기간 자료의 특수성이 반영된 결과를 산출할 수도 있다. 따라서, 보다 적절하고 신뢰성있는 변수추정결과를 얻기 위해서는 장기적인 양질의 자료구축이 필수적이라 할 수 있다. 아울러, 수질항목 농도예측의 가장 중요한 인자는 유입유량으로 판단되기 때문에 유량 및 수질의 동

시 측정 자료의 구축도 병행되어야 한다. 또한, 비점오염원의 영향이 크기 때문에 비점오염원의 정량적 평가에 관한 연구, 비점오염원 모형과 WASP4 모형의 접속수행에 관한 연구가 필요하다. 그리고, 본 모형은 기본적으로 1차원모형이기 때문에 폭이 넓은 하구나 호소에 적용하기 위해서는 2-3차원 모형으로의 확장 및 개선이 필요하다.

감사의 글

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

참고문헌

國立環境研究院(1989.12). 八堂 上水源 保護 綜合對策에 관한 研究(2次年度),附錄.

國立環境研究院(1990.12). 八堂 上水源 保護 綜合對策에 관한 研究(3次年度),附錄.

氣象廳(1989). 氣象年譜.

氣象廳(1990). 氣象年譜.

李弘根, 朴仁輔(1990.12). 八堂湖 試驗湛渫 影響調査 報告書, 環境處.

韓國電力公社, 發電處, 水力發電部(1991). 水力發電所 運用資料集(1971 - 1990 實積).

韓國綜合技術開發公社(1992). 팔당호 호분일람도.

Ambrose Jr. R.B., Wool T.A., Connolly J.P. and Schanz R.W.(1988.1). WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model Theory, User's Manual, and Programmer's Guide, EPA, EPA/600/3-87/039.

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.(1985.6). Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling(2nd Ed.), Tetra Tech, EPA/600/3-85/040.

Brown L.C. and Barnwell T.O.(1987.5). The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS : Documentation and User Manual, EPA, EPA/600/3-87/007.

Organization for Economic Co-operation and Development(1982). Eutrophication of Waters : Monitoring, Assessment and Control, OECD.

Thomann R.V. and Mueller J.A.(1987). Principles of Surface Water Quality Modeling and Control, Harper & Row, Chaps.6-7.

표 1 EUTRO4 모형의 複雜度와 모의수질항목

| System Number | Symbol | 모의수질항목 | Use in Complexity Level 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | NH3 | Ammonia Nitrogen | | x | x | x | x | x |
| 2 | NO3 | Nitrate Nitrogen | | | x | x | x | x |
| 3 | PO4 | Inorganic Phosphorus | | | | x | x | x |
| 4 | CHL | Phytoplankton Carbon | | | | x | x | x |
| 5 | CBOD | Carbonaneous BOD | x | x | x | x | x | x |
| 6 | DO | Dissolved Oxygen | x | x | x | x | x | x |
| 7 | ON | Organic Nitrogen | | | x | x | x | x |
| 8 | OP | Organic Phosphorus | | | | x | x | x |

표 2 EUTRO4 模型에서 사용된 反應係數의 범위

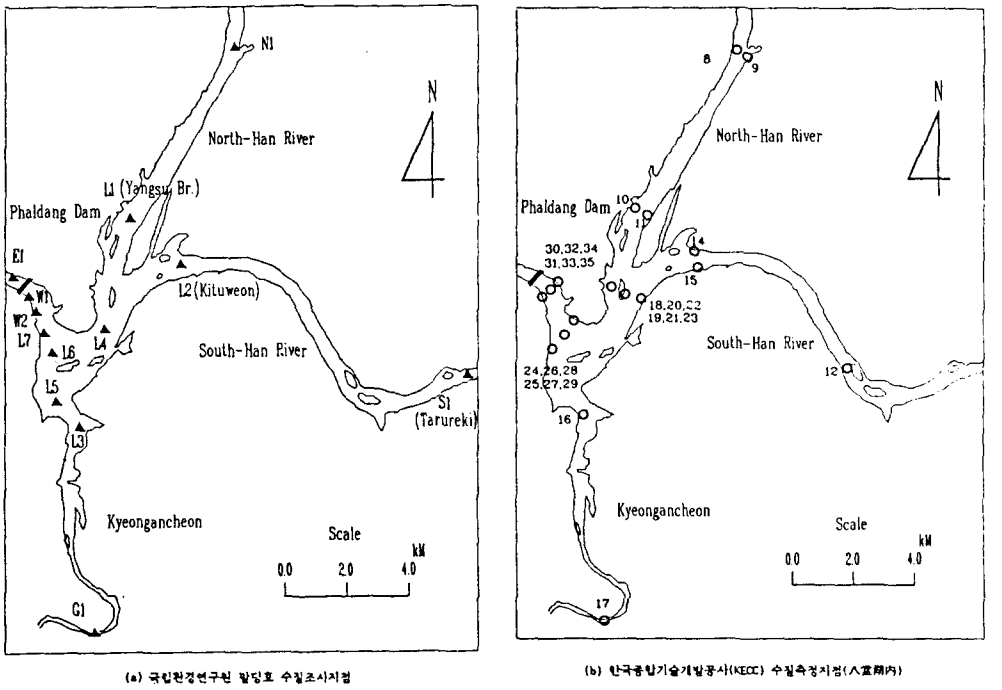
| 반 응 계 수 | Manual[1] | 환 경 처[2] | Text[3] | Tetra Tech[4] |
|---|---|---|---|---|
| $k_{12}$ | 0.09-0.13 | 0.09 | 0.1-0.5 | Tab.3.22,5.3 |
| $\theta_{12}$ | 1.08 | - | 1.08 | Tab.3.20,5.3 |
| $G_{1max}$ | 2.00 | 2.00 | 1.8(1.5-2.5) | Tab.6.5 |
| $\theta_1$ | 1.069 | - | 1.066 | |
| $k_{1R}$ | 0.125 | 0.125 | 0.15(0.05-0.25) | Tab.6.18 |
| $\theta_{1R}$ | 1.045 | - | 1.08 | |
| $k_{1D}$ | 0.02 | - | 0.02 | Tab.6.20 |
| $a_{PC}$ | 0.025 | - | - | Tab.6.3 |
| $a_{NC}$ | 0.25 | - | - | Tab.6.3 |
| $k_d$ | 0.16-0.21 | 0.14 | 0.1-0.5(d≤5ft) | Tab.3.1 |
| | - | - | 0.5-3.0(d≥5ft) | |
| $\theta_d$ | 1.050 | - | 1.047(1.02-1.09) | Tab.3.17 |
| $a_{OC}$ | 2.67 | - | - | |
| $k_a$ | - | - | - | Tab.3.11 |
| $k_{71}$ | 0.075 | - | - | Tab.5.3 |
| $\theta_{71}$ | 1.08 | - | - | Tab.5.3 |
| $k_{83}$ | 0.22 | - | - | Tab.5.5 |
| $\theta_{83}$ | 1.08 | - | - | Tab.5.5 |

(1) Ambrose R.B., et al(1988). WASP4,A Hydrodynamic and Water Quality Model, EPA.
(2) 이홍근,박인보(1990.12),팔당호 시험준설 영향조사 보고서,환경처
(3) Thomann, R.V. and Mueller, J.A.(1987), Principles of Surface Water Quality Modeling and Control, Chaps.6-7.
(4) Bowie, G. L., et al.(1985.6). Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling (2nd Edition), Tetra Tech, EPA/600/3-85/040.

표 3 EUTRO4 模型의 變數推定 結果

| 매 개 변 수 | 봄 | 여름 | 가을 |
|---|---|---|---|
| $k_{12}(day^{-1})$ | 0.10 | 0.10 | 0.25 |
| $G_{1max}(day^{-1})$ | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| $a_{NC}$ | 0.40 | 0.40 | 0.40 |
| $a_{PC}$ | 0.20 | 0.20 | 0.20 |
| $a_{OC}$ | 2.60 | 2.60 | 2.60 |
| $k_{1R}(day^{-1})$ | 0.05 | 0.15 | 0.15 |
| $k_{1D}(day^{-1})$ | 0.00 | 0.10 | 0.10 |
| $k_d(day^{-1})$ | 0.025 | 0.050 | 0.020 |
| $k_a(day^{-1})$ | 0.00 | 0.50 | 1.00 |
| $k_{71}(day^{-1})$ | 0.01 | 0.01 | 0.10 |
| $k_{83}(day^{-1})$ | 0.10 | 0.05 | 0.05 |
| $SS_1(g/m^3/day)$ | 50.00 | 300.00 | 20.00 |
| $SS_3(g/m^3/day)$ | -30.00 | -15.00 | 4.00 |
| $K_e(m^{-1})$ | 0.4,0.8 | 0.4,0.8 | 0.4,0.8 |

주 : 봄의 경우, $\sigma_4$=0.1(m/day)이며, $K_e$값의 入力時 경안천 流入水域(경안천 流入水域 7개 구획-구획번호 16-19,34-36번)은 다른 지역과 다른 값을 入力하여 지역적인 특성을 고려하였다.




(a) 국립환경연구원 팔당호 수질조사지점

(b) 한국종합기술개발공사(KECC) 수질측정지점(스크린內)

그림 1. 팔당호 수질 상시측정망 위치도

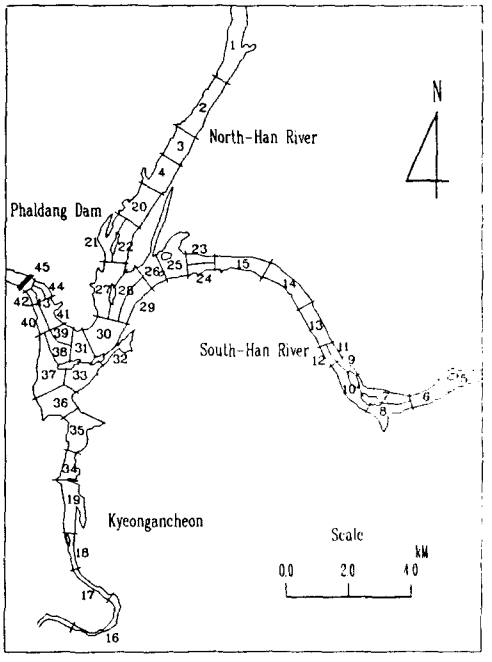



그림 2. 팔당호 수질예측을 위한 구획분할

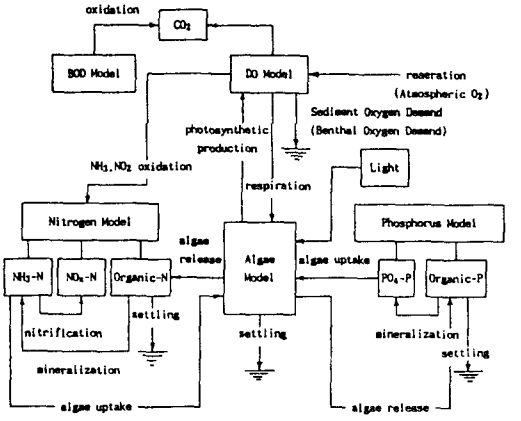
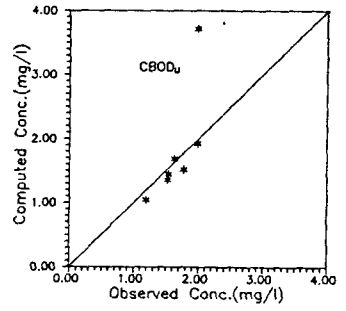
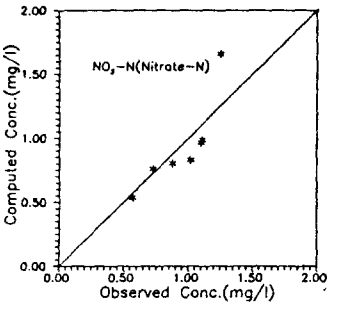


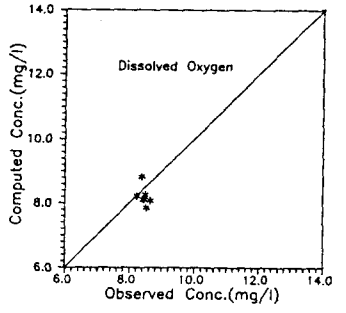

그림 3. EUTRO4 모형의 반응모식도



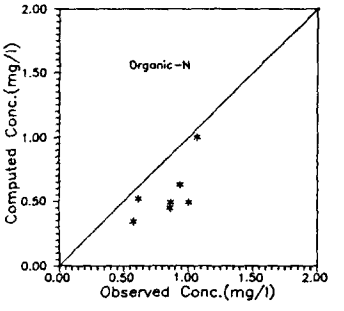

(a) BOD



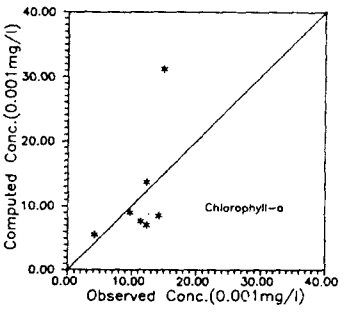

(e) $NO_3$-N



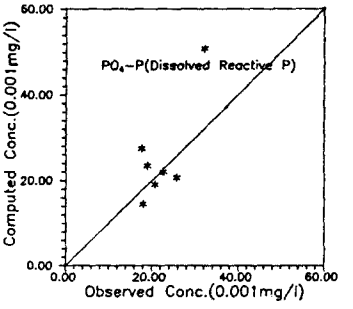

(b) DO



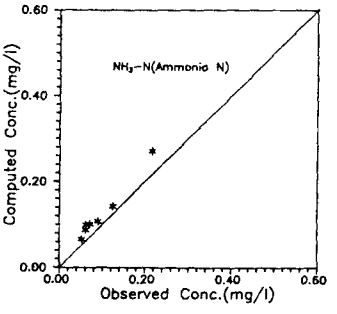

(f) Organic-N



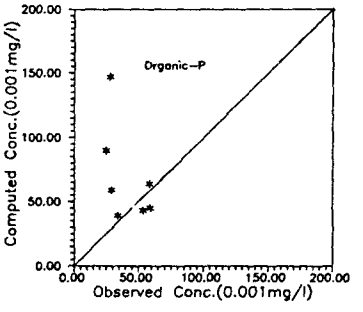

(c) Chlorophyll-a




(g) $PO_4$-P




(d) $NH_3$-N




(h) Organic-P

그림 4. 모형의 변수추정 결과(여름)

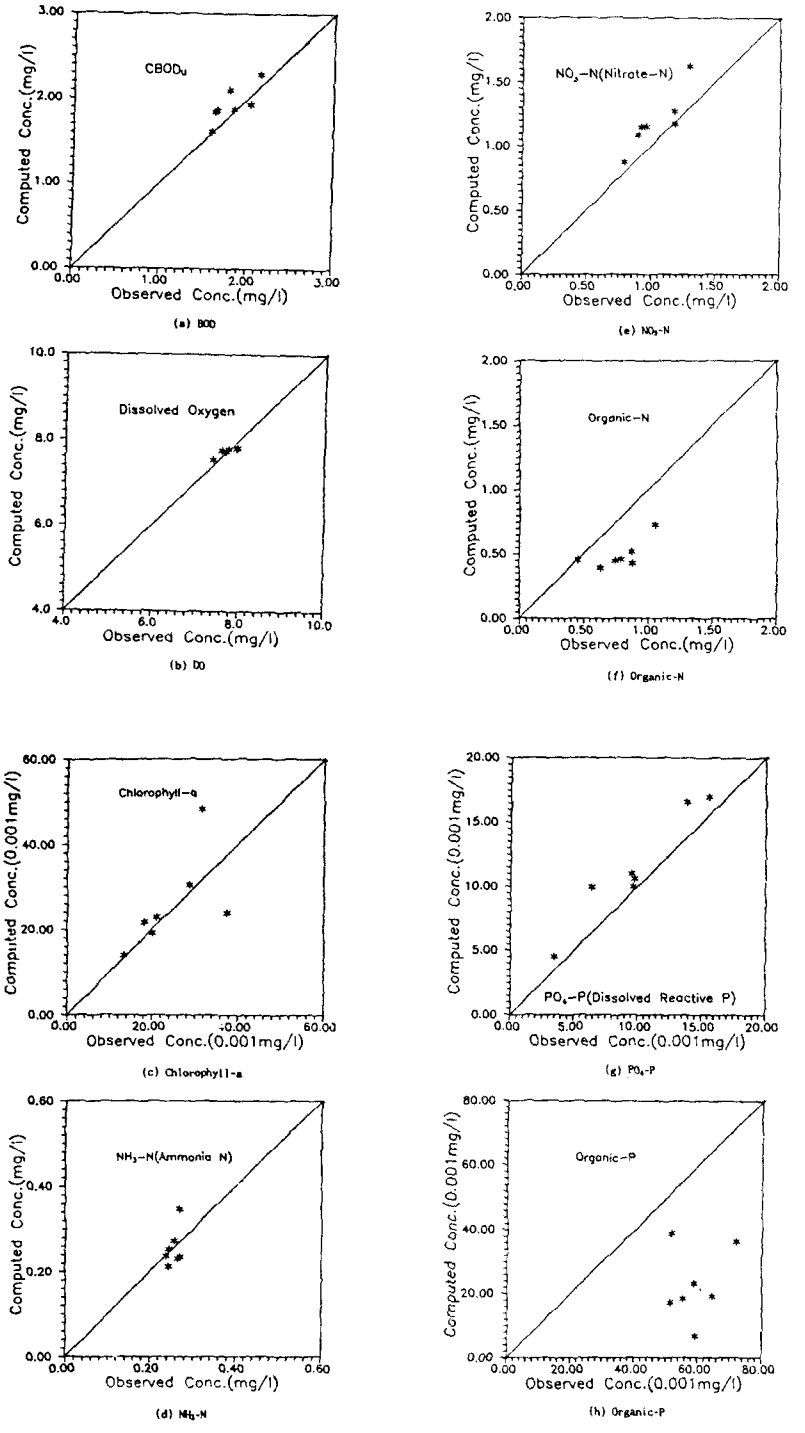



그림 5. 모형의 검증 결과(여름)