

貯水池에 對한 藻類 模型의 適用性 檢討

李 弘 根 · 李 俊 鎬

서울大學校 保健大學院

A Study on the Application of Simple Phytoplankton Model for Reservoir

Hong Keun Lee · Jun Ho Lee

Graduate School of Public Health Seoul National University

ABSTRACT

The purpose of this study was development of a simple phytoplankton model for reservoir and applied DaeCheung reservoir. The effects of light intensity, $PO_4\text{-P}$, settling rate and flushing loss on phytoplankton growth are analyzed. This paper describes as investigation of the potential of simple phytoplankton models to display chaotic instability, but given the observation of chaotic behavior in other simple simulation systems, such behavior may actually be real fluctuation in the system response.

I. 序 論

藻類는 植物性 藻類와 動物性 藻類로 크게 분류되고 있으나 湖水富營養化의 일반적인 지표는 植物性 藻類이다. 또한 저수지의 富營養化에 문제시되는 藻類의 종류는 주로 植物性 藻類가 지배적이다.^{3,4,10)} 식물성 조류의 성장을 지배하는 營養物質과 光度, 溫度와 같은 外的因子간에 相互作用을動的으로 模型化한 연구로써 Lehman 등(1975)은 定常的 混合層湖水에 대해 植物性藻類모형을 연구하였다.⁸⁾ Gulliver(1982)등은 藻類成長制限因子인 $PO_4\text{-P}$, 햇빛, 그리고 온도를 이용하여 상·하층과의 이동을 고려하여 植物性藻類模型을開發하였다.⁷⁾ 이 模型에서는 Jorgensen(1984)은 수

심이 얇은 호수의 富營養化를 植物性藻類와 동물성조류의 특성을 이용하여 模型化 하였다.^{3,9)} 어떤湖水에서나 適用이 가능한 一般的인 富營養化 模型은 존재하지 않는다. 왜냐하면 모든 호수들은 각각의 特性을 가지고 있으므로 模型化 대상에 대한 전반적인 생태계에 대한 지식을 알고 있어야 한다.

模型은 豫測結果가 정확한 것을 생명으로 하지만, 될수록 간단하고 사용하기에 편리하여야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 점을 고려하여 계절별로 藻類의 成長과 死滅에 영향을 크게 미치는 주요 要因에 대한 模型을 選定하여 검토하였다. 모형작성 프로그램은 spreadsheet인 SMART package를 사용하였다.¹²⁾

II. 藻類模型의 理論

간단한 太陽輻射熱의 模型, L은 다음과 같다.

$$L = A - B \cos \frac{(\text{day}-21)\pi}{182.5} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, day : 해당년의 일자

A : 연평균 조도(light intensity)

B : 최대 조도와 평균조도의 差

이다. 식(1)에서 cosine항은 年初日에 높이고 봄과 가을이 시작되는 날자에서는 $\pi/2$ 와 $3\pi/2$ 이며 여름이 시작되는 날자에서는 π 의 값이다. 그러므로 조도는 여름이 시작되는 날자(北半球에서는 6월 21일)에서 最大값이 되며, 겨울이 시작되는 날자(北半球에서는 12월 21일)에서 最低값이 될 것이다.

하룻동안 물이 받는 햇빛의 總量은 해당날의 조도의 함수일 뿐더러 상층 깊이의 함수관계를 가진다. 水體가 여름이 시작하는 날자에 성층화가 강하게 발생했다면 상층의 수심은 전체 수심에 비해 적은 부분에 해당한다. 상층의 물은 입사되는 햇빛에 많이 노출되어 있다. 여름이 시작되는 날자에 물이 완전히 혼합되었다면 깊은 수심을 가진 水體의 물은 photo zone 밑에서 많은 햇빛의 입사량을 소모하기 때문에 전체 가용입사량의 10%만이 받아 드리는 셈이다. 植物性 藻類의 계절별 변화를 模擬하기 위해서는 상층 photo zone의 깊이를 표시하는 模型이 필요하다. photo zone인 상층 깊이 H에 대한 模型은 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$H = C + D \cos \frac{\beta\pi(\text{day}-21)}{182.5} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, C : 해당년의 평균 상층 깊이(최대수심/2)

D : C와 최대 또는 최저 깊이의 차

β : storm 상수, 1 또는 2

β 가 1일때, 상층의 깊이 D는 겨울이 시작되는 날자에 최대이고 여름이 시작되는 날자에 최저가 된다. β 값을 2로 하면 상층의 깊이는 가을에 최소값을 나타내며 겨울과 여름에는 최대값이 된다.

침강, 호흡, flushing으로 인한 조류 손실을 고려하여 模型化할 때 藻類 成長은 다음 식(3)과 같은 制限 營養物質의 模型을 사용하여 추정할 수 있다.

$$\frac{dA}{dt} = \left[\frac{\mu_{\max} \frac{PH_{\text{avg}}}{K_s + P}}{H} - V_s - K_r - \rho \right] A \dots\dots (3)$$

여기서, A : 조류의 농도

μ_{\max} : 조류의 최대 성장률

P : 營養物質의 농도

K_s : 營養物質 P에 대한 반포화농도

H_{avg} : photic zone의 평균깊이(seccchi 깊이)

V_s : 조류의 침강율(sinking rate)

K_r : 조류의 사멸율(death rate)

ρ : flushing rate

이다. 營養物質 P는 藻類의 섭취로 인한 손실, 외부의 유입, 하층의 풍부한 營養物質의 물리적 혼합으로 인한 내부 유입등을 가지고 模型化한다. 하층의 물이 상층의 물과 혼합 되는 경우에 상층의 농도 변화는 간단한 물질수지 관계식으로 표시할 수 있다. 營養物質에 대한 시간적 변화율에 대한 일반적 물질 수지의 평형 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dP}{dt} = -k \frac{dA}{dt} + ES + IS(h, h_{\text{day}}) \dots (4)$$

여기서, k : 藻類에 대한 營養物質의 比

ES : 외부 유입원의 營養物質 농도

IS : h의 함수로 표시되는 것으로 내부에서 負荷되는 營養物質濃度

h : 혼합으로 인한 상층 깊이의 변화

h_{day} : 上層의 水位가 規定水位 보다 적게 된 以後의 日數이다.

微分方程式에 대한 간단한 Euler해법은 시간 간격이 너무 길면 數值的으로 불안정 하게 된다.²⁾ 이와같은 불안정을 최소화 하기 위하여 일부 변수의 最大 變動幅을 실제 변화를 0.1단위로 제한 하였다. 本 模型에서 사용되고 있는 햇빛, Chlorophyll-a, PO₄-P 그리고 침전을, flushing을 등의 항목에 대한 상호작용 흐름도를 Fig. 1에 도시하

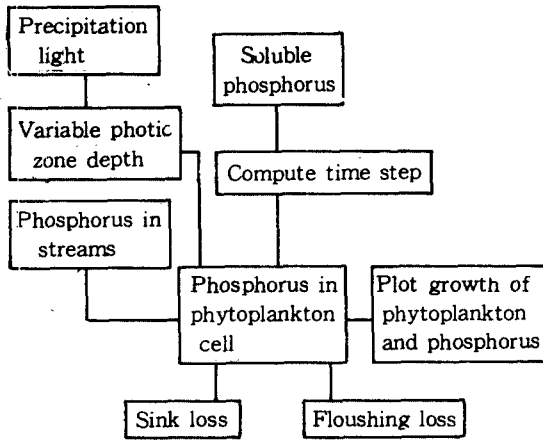


Fig. 1. Illustration of reservoir simple phytoplankton model.

였다.

III. 模型의 適用性 檢討

1. 適用對象

上記한 模型을 가지고 模擬한 對象 貯水池는 大淸湖이다. 大淸호는 금강본류의 중류부에 위치한 다목적 댐으로 댐의 제원은 Table 1과 같다. 大淸호 유역은 임야면적이 약 77%이고 농경지가 약 15%이며 중부내륙에 위치하고 있기 때문에 전반적으로 내륙성 기후의 영향을 받고 있다. 6~9월 사이에 연간강수량의 약 70%정도가 집중되고 있다. 大淸호 유역내의 수질 조사지점은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 호수내에서 8개지점이다. 조사기간은 1986년 4월부터 11월까지로 8개월 간이다.^{1,6)} 질소의 농도가 인의 농도보다 7.2배이상이면 한계 영양물질이 인이 되는 것으로 간주할 수 있다. 大淸호의 총질소(TN)의 연평균농도는 1.292mg/l, 총인(TP) 연평균농도는 0.052mg/l이므로 총질소와 총인의 비가 24.85가 되어 조류가 이용할 수 있는 TP는 4.3배(24.85/7.2)이상 많이 존재한다. TP중 植物性藻類가 실제 이용가능한 물질은 용해성인 성분으로 구성된 $PO_4\text{-P}$ 이므로 영양물질 P를 $PO_4\text{-P}$ 로 간주하였다.

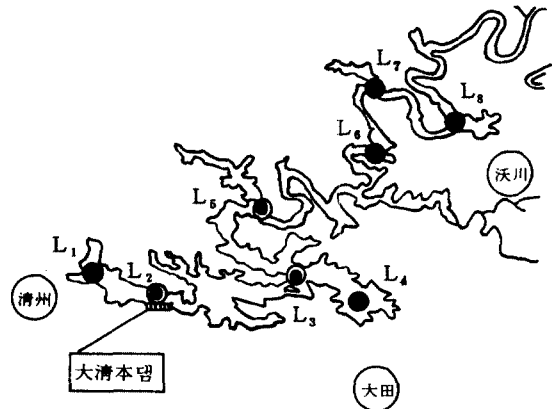
2. 變數補正

모형에 사용하는 변수들은 현장측정자료 또는

보정(calibration)을 통해 추정한다. 민감도분석을 통해 보정할 변수를 선정하게 되는데 변수값의 범위는 문헌이나 실험을 통해 보정할 범위를 선정한다.^{3,9)} 입력자료 및 변수는 현장측정 및 문헌^{2,3,5,6,7,9)}을 참고하였다. 예비적인 모의를 통해 조류의 성장에 매우 변동폭이 큰 계수값은 조류 반포화상수와 조류침강율을 알 수 있었다. 따라서 두 변수들의 미세한 변화를 주어 조류 변동을 분석하였다. Fig. 3와 Fig. 4은 이들 두 변수에 따른 조류의 민감도분석을 나타내었다. 반포화상수와 조류침강율이 정확한 模型構成에 매우 중요한 의미를 지니고 있음을 알 수 있다.

Table 1. Morphometric characteristics of Dae Cheung reservoir

Catchment area	4,134 km ²
High water level EL	76.5 m
Low water level EL	60.0 m
Storage capacity	1,490 × 10 ⁶ m ³
Surface area	72.8 km ²
Annual volumn rate of water outflow	3,165 × 16 ⁶ m ³
Mean depth	20.4 m



No.	Sites	No.	Sites
L1	청주취수장앞	L5	해남교앞
L2	본댐앞	L6	옥천분뇨처리장앞
L3	주호리앞	L7	장계교앞
L4	대전취수장앞	L8	옥천취수장앞

Fig. 2. Watershed of Dae Cheung reservoir.

모델의 결과치를 산출하기 위해서 모델에 이용되는 변수에 대한 보정을 실시하였다. 모델의 보정은 모델에 의한 계산치가 실측치와 어느 정도 일치할 수 있는가와 불확실한 변수들을 재현능력이 향상될 수 있도록 재조정하므로써 모델에 적합한 최적변수를 구하기 위한 것으로 계산치와 실측치를 비교하여 오차를 최소화하는 것이다. 모의에 필요한 대청호의 관측자료 및 보정을 통한 입력변수는 다음 Table 2와 같다.

상기의 변수를 모델에 적용하여 365일간의 영양물질과 植物性藻類에 변동을 모의한 결과는 Fig. 5에 제시하였다. $PO_4\text{-P}$ 는 연중 변동이 적은 편으

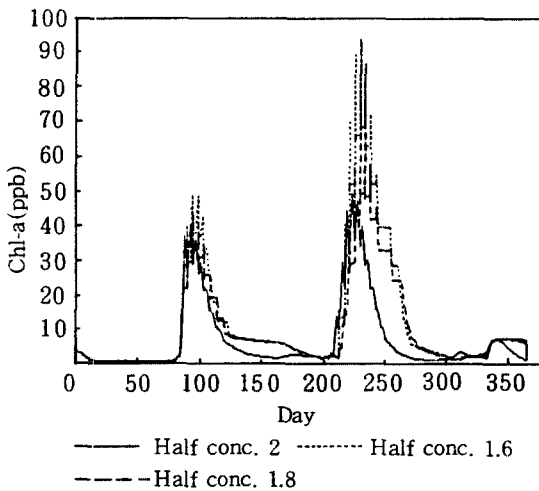


Fig. 4. Sensitivity of chlorophyll-a to half saturation constant.

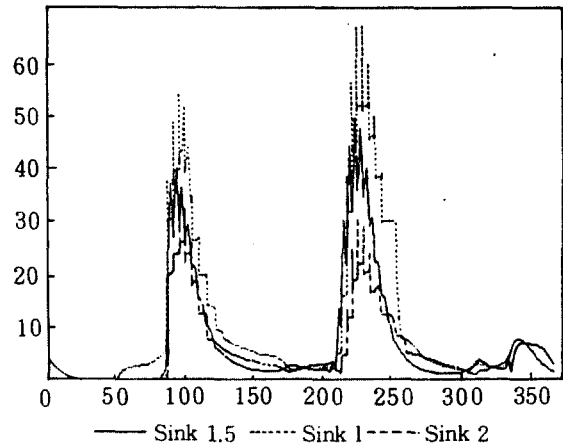


Fig. 3. Sensitivity of chlorophyll-a to phytoplankton settling velocity.

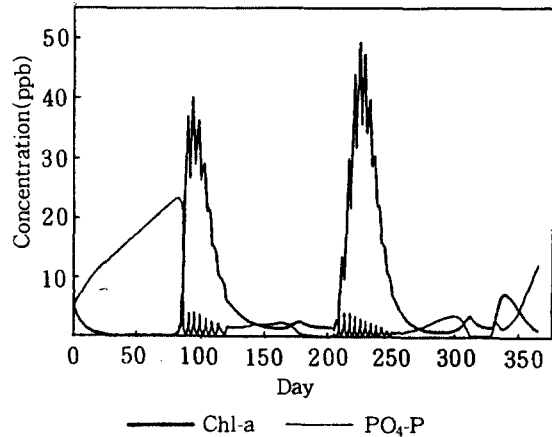


Fig. 5. Simulated chlorophyll-a and $PO_4\text{-P}$ concentration for Dae cheung reservoir.

Table 2. Summary of coefficients used in phytoplankton model

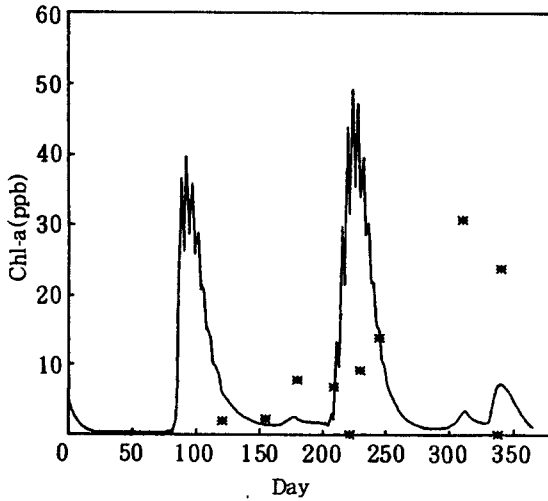
Definition	Unit	Range	Value	Value based upon
Initial phytoplankton conc.	ppb	1.5 ~ 13.5	5.0	Measurements
Initial $PO_4\text{-P}$ conc.	ppb	5.0 ~ 20.0	5.0	Measurements
Maximum depth	m		25.0	Measurements
Time Interval	day	2.0	2.0	
External $PO_4\text{-P}$ conc.	ppb/day	0.15	0.15	Measurements
Phytoplankton death rate	/day	0.1	0.1	Literature
Maximum growth rate	/day	1.0 ~ 3.0	2.53	Calibration
Half saturation constant		1.5 ~ 2.5	2.0	Calibration
Storm constant		1 ~ 2	2	Calibration
Settling rate	m/day	0.5 ~ 6.0	1.5	Literature
Internal $PO_4\text{-P}$ conc.	ppb	5.0 ~ 20.0	13.0	Measurements
Average photic zone	m	1.6 ~ 3.6	2.8	Measurements

로 나타났다. 植物性藻類는 富營養化 허용치(20 ppb)를 초과할 때가 봄철과 늦여름에 나타나고 있는데 여름에 더욱 수화현상이 크게 나타나고 있음을 보여주고 있다.

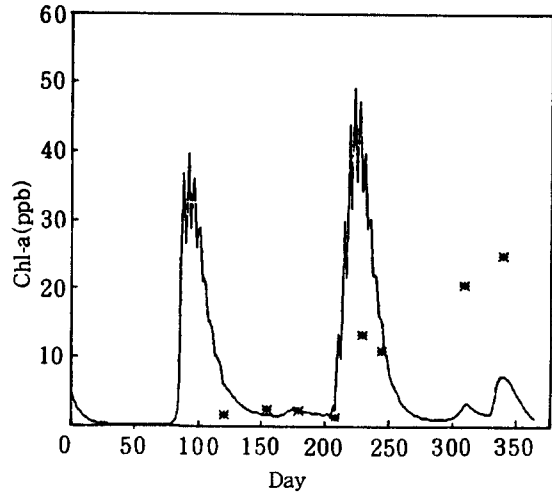
3. 地點別 藻類變動

대청다목적저수지에 본 模型에서 모의된 植物性藻類의 연간변동을 8개측정 지점에서의 자료와 비교를 실시하였다. 적용된 8개지점은 Fig. 2에 제시되어 있고 Fig. 6a에서 Fig. 6h에 실제측정자

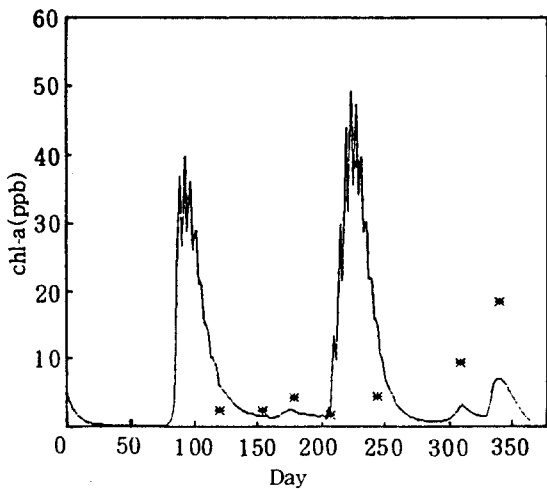
료와 비교하였다. Fig. 6에서 보듯이 L_0 에서 L_4 지점은 거의 경향이 일치하고 있음을 알 수 있다. 측정지점 L_1 과 L_2 지점은 청주취수원과 대청본댐앞이므로 비교적 유량 변동이 심하여 본 模型과는 늦여름에 발생하는 식물성 조류의 첨두치와 일치하고 있지 않은 결과를 가져온 것으로 생각된다. 그러나 나머지 댐상류지점에서는 유량의 변동이 비교적 안정적이므로 模型과 첨두치가 거의 일치하는 결과를 가져온 것으로 판단된다.



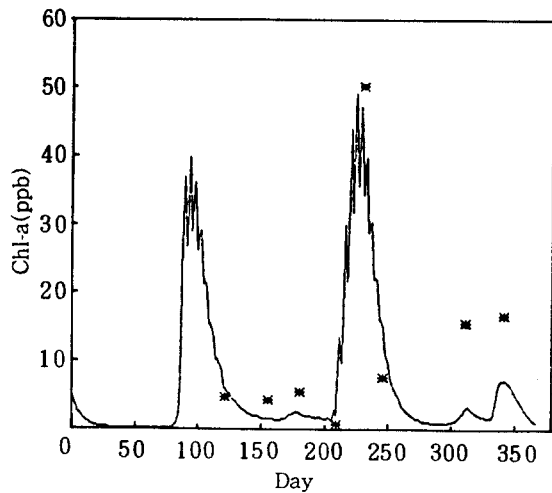
(a) Site L_1



(b) Site L_2



(c) Site L_3



(d) Site L_4

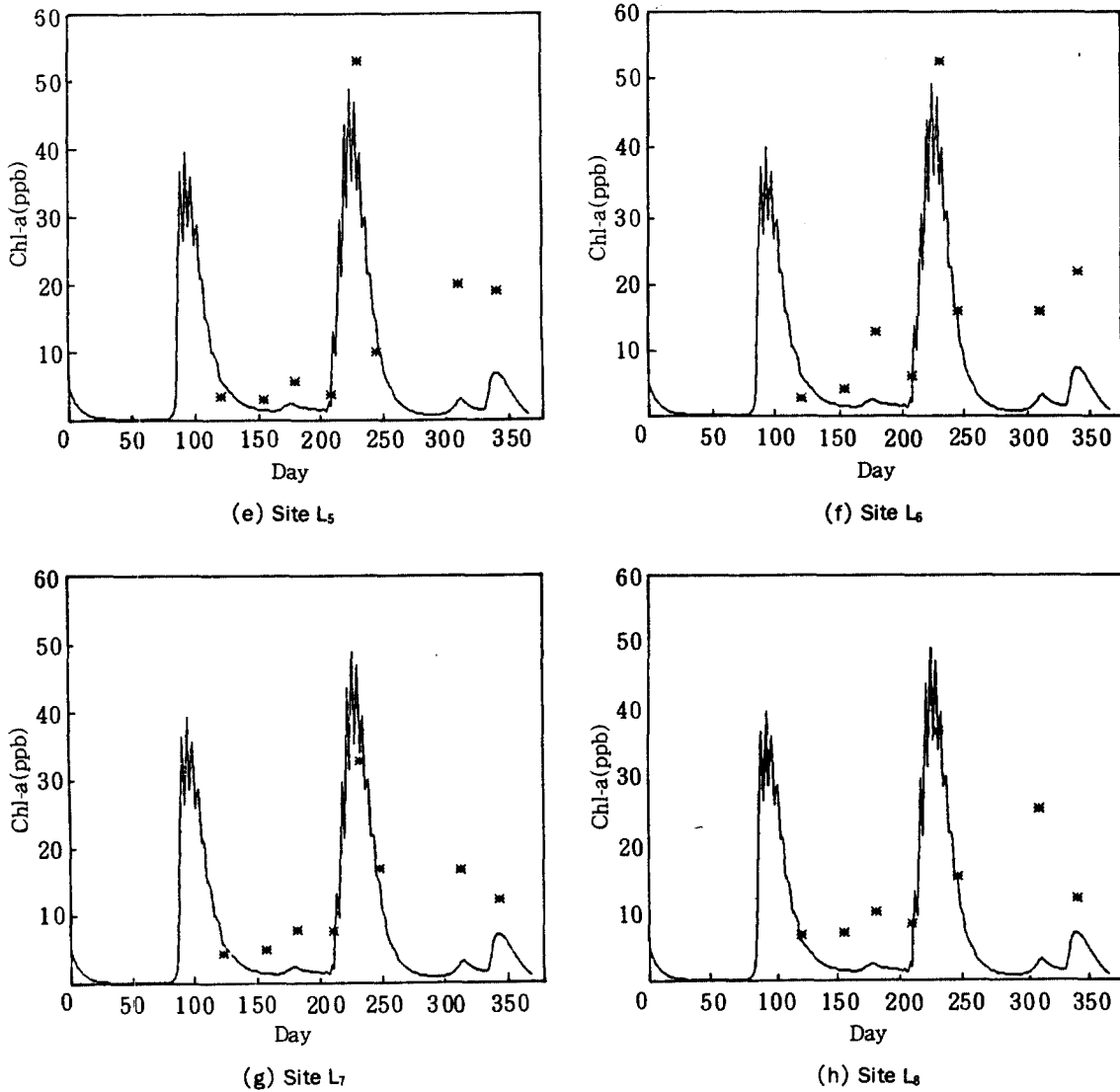


Fig. 6. Comparison between simulated and observed chlorophyll-a value for each site.

IV. 結 論

본 모형은 藻類成長에 주영향인자인 영양물질 $PO_4\text{-P}$ 와 조류침강 및 유출 손실을 고려한 단순한 모형으로 적은 입력자료로서 植物性藻類의 일별 변동에 대해 모의할 수 있다. 모형係數에 대한 敏感度를 분석 및 계수보정후 대청다목적저수지에 모형을 적용하여 식물성 조류에 대해 365일간을

모의한 결과 다음과 같은 결과를 가져왔다.

1. 식물성 조류의 연중 변화를 모의한 결과 초봄과 늦여름에 식물성조류의 부영양화기준인 20ppb를 초과하였다.
2. 조류의 침전속도와 반포화상수가 모형에 가장 민감도가 컸다.
3. L_1 과 L_2 지점은 청주취수원과 대청본담 앞이므로 비교적 수리학적 인자의 변동이 심하여 본 모형과는 늦여름에 발생하는 식물성 조류의 침두

치와 일치하고 있지 않은 결과를 가져온 것으로 생각된다.

4. 댐상류지점에서는 유량의 변동이 비교적 안정적이므로 模型과 침투치가 거의 일치하는 결과를 가져온 것으로 판단된다.

參 考 文 獻

- 1) 산업기저개발공사, '86대청다목적댐 유역내 수질 및 오염원조사연구 보고서, 1986. 12.
- 2) 한국건설기술연구소, PC용 하천수질관리 모델의 개발(I); 반응계수에 대한 연구를 중심으로, 1987.
- 3) S.E.Jorgensen, Fundamental Ecological Modelling, Elsevier Company, 12~15, 1987.
- 4) S.C.Chapra, K.H.Reckhow, Engineering Approaches for Lake Management, Vol. 2: Mechanistic Modeling, Ann Arbor Science, 1983.
- 5) 방기웅, 하구담수호 수질예측모형의 개발, 서울시립대학교 대학원 박사학위논문, 1990.
- 6) 이형진, 대청호의 SIMPLE PHOSPHORUS BUDGET MODEL에 관한 조사연구, 한국수질보전학회지, 제3권 1호, 1987.
- 7) J.S.Gulliver and H.G.Stefan, Lake Phytoplankton Model With Destrafiation, J. Envir. Eng. Div. ASCE, Vol. 108, No. EE5, 864~882. 1982.
- 8) J.T.Lehman, D.B.Botkin, The Assumptions and Rationales of a Computer Model of Phytoplankton Population Dynamics, Limnology and Oceanography, Vol. 20, No. 3, 1975.
- 9) S. E. Jorgensen, Modelling the Eutrophication of Shallow Lakes, Water Quality Bulletin, Vol. 9, No. 1, 48~59, 1984.
- 10) J.I.Parker, H.L.Conway, and E.M.Yaguchi, Seasonal Periodicity of Diatoms, and Silicon Limitation in Offshore Lake Michigan, 1975, Water Res, Vol. 34, 552~558, 1977.
- 11) M.J.Hammer, K.A.Mackichan, Hydrology and Quality of Water Resources, John Wiley & Sons, 1981.
- 12) A.N.Schwartz, Using SMART, Que Corporation, 1987.