

湖沼水質模型의 現況과 開發方向

Review and Issues for Future Research of Lake Reservoir Water Quality Model

趙 烘 釐*

1. 緒 論

수자원의 저장공간으로 활용되고 있는 호소는 도시화·산업화에 의하여 발생하는 오염물질의 다량 유입으로 인하여 수질이 점차 악화되고 있다. 용수 공급 및 발전 등의 목적을 위하여 확보된 수자원을 용도에 부합되게 활용하기 위해서는 적정수준의 수질 유지·관리에 대한 대책이 수립되어야 하며, 적절한 대책수립을 위해서는 오염물질이 호소수질에 미치는 영향을 정량적으로 파악할 수 있는 수질모형이 구축·활용되어야 한다(이길성, 조홍연, 1995). 따라서, 본 論考에서는 호소의 수질변동을 예측하고, 종합적인 수질관리시스템 구축에 필수적인 수질모형의 현황 및 문제점을 체계적으로 파악하고, 향후 수질모형의 개발방향을 제시하고자 한다.

2. 水質模型의 現況

수질모델링은 수질모형의 개발 및 적용(모형의 보정 및 검증·적용) 등의 단계적 과정에 해당하며, 일반적으로 모형이 모의하는 현상(흐름, 成層化, 富營養化, 赤潮 및 綠潮, 독성오염물의 운송 및 확산 등)에 따라 물리적·화학적·생물학적 모형으로 분류할 수 있다(James, 1993). 또한, 수질모형

은 水體(하천, 호소, 하구 및 해안·해양 등), 모의 시간 및 영역, 모의목적(운영모형 또는 계획모형)에 따라 다양하게 분류될 수 있다. 초기의 수질모형은 하천 및 호소 수질모형으로 분류되어 개발되어 왔으나, 현재는 多次元 수질모형으로 확장되어 모의항목 및 모의현상이 통합되고 있는 상황이다(조홍연, 이길성, 1995 ; Table 1 참조).

2.1 모형의 구성요소 및 모의범위

호소 수질모형은 호소에서 발생하는 제반 현상을 모의하기 위한 副模型(submodel)으로 구성된다. 호소에서 발생하는 주요 현상은 질소, 인 등의 營養鹽類(nutrients) 유입에 의한 부영양화 현상 및 녹조현상, 햇빛 및 온도차에 의한 성층화 현상, 각종 오염물질의 침전으로 인한 저층의 오염 및 저서생물(benthic organism)의 폐사, 저서생물의 산소 소비 및 성층화로 인한 표층 산소공급의 차단으로 인한 貧酸素(hypoxia) 水塊의 형성 등 다양하다. 기존의 호소수질모형은 부영양화 정도(호소의 영양상태)를 판정하기 위하여 영양염류(주로 총인)와 藻類의 관계에 중점을 두고 수행되었으며, 최근에도 영양염류 항목의 세분화 및 저층 堆積汚泥로부터 용출되는 오염물질의 영향 등을 추가적으로 모형에 포함시키고 있다.

따라서, 호소수질모형은 부영양화 현상의 모의를

* 한국해양연구소

Table 1. Comparison and Evaluation of Water Quality Models

Categories WQ Models	State, Dimension, Type of GE	Simulated WQ Constituents	Computational Method of Flow and Conc. Field	Solution of GE	Characteristics	Major Similar Models and Related Submodels
Streeter-Phelps Type Model (Orlob, 1983, Lee et al., 1991)	1-D Steady State ODE (Advection, Diffusion)	BOD, DO, N, Bed Sedi- ment Effect, DO Diurnal Varia- tion	Steady State Value Input, Continuity Eq.(Q=AV)	Analytic Sol., Numerical Sol. of ODE	Flow-Direction Segmentation(reach)	Dobbins Mode, O'Connor & DiToro Model DOSAG Series Model**
Vollenweider Type Model (Henderson-Sellers, 1984, Seo, 1991)	1-D Steady State ODE (Layer Model : Diffusion)	Total N, Bed Sediment Ef- fect, P of the Classified Forms,	Equal to above Cell	Equal to above Cell	Vertical Segmenta- tion (slice or layer)	Dillon & Rigler Model, Snodgrass & O'Melia Model, Thomann Model
CE-THERM Type Model (Orlob, 1984, Biswas, 1981)	1-D Steady State PDE (Vertical Diffusion)	Temp., BOD, DO, Temp. Structure of Stratified Water Body	Equal to above Cell	Numerical Sol.	Vertical Segmenta- tion (slice or layer)	WRE, WES, WESTEX Model Explore-1 Model MLTM, DYRESM, DRM MIT Lake & Reservoir Model
QUAL2E Model (Orlob, 1983, Brown & Barnwell, 1987)	1-D Steady State PDE	Temp., N, P, Phytoplank- ton, BOD, DO, and Ecological Const.	Discharge Coeff.(h=aQ ^{0.5} , v=cQ ^{0.4}) Dispersion Coeff. K=Fu ^{0.8} h	Numerical Sol.	Uncertainty Analysis (QUAL2E-UNCAS) 1-D model of link- node type	QUAL-1, II Model CE-QUAL-RIV1 Model CLEAN, CLEANER, MS CLEANER Model
WORRS Model (Smith, 1978, Orlob, 1983)	1-D Dynamic State PDE	Abiotic and Biological Const., Temp., River-Reservoir Link	River : 6-option, Reservoir : 2-option Effective Viscosity : 2- option	Numerical Sol.	1-D model of link- node or slice-segment type	EPAECO Model, LAKECO Model, MINLAKE
WASP4 Model (Ambrose et al, 1988)	1-D Dynamic State PDE	Phytoplankton, N, P, BOD, DO, Sediment Flux of Bed	DYNHYD4 Submodel, Link of TOX4 Model	Numerical Sol.	Compartment Model, 6 Complexity level, Extension of 2, 3-D region	PEM, WASP Model,
Vertical 2-D WQ Models (Bowie et al, 1985, Martin, 1988)	Laterally-Averaged 2-D PDE, Dynamic State	Temp, DOM, N, P, Conservative Const, DO	Vertical 2-D Continuity and Momentum Eq(x-z). LARM, LARM2	Numerical Sol.	Stratified water body	CE-QUAL-W2 Model GLVHT Model LARMECO(Lee, 1992)
Horizontal 2-D WQ Models (Bowje et al, 1985)	Depth-Averaged 2-D PDE, Dynamic State	Salinity, Temp., DOM, N, P, DO, 1-Order Decay Mat- ter	Horizontal 2-D Continuity and Momentum Eq(x-y).	Numerical Sol.	Well-mixed water body	Leendertse Model, TRANQUAL, MIKE21, 2HD Model(Cho, 1994)
3-D WQ Models (Cerro & Cole, 1993)	Compartment 3-D Model, Dynamic State	Salinity, Temp., DOM, C, N, P, DO, 2-Algae Consts., 1-Order Decay Matter	Continuity Eq. and 3-D Momentum Eq., CH3D- WES	Numerical Sol.	Compartment Model, General water body	CE-QUAL-CM CBMP, EUTROP

Description WQ : Water Quality, GE : Governing Equation, N : Nitrogen, P : Phosphorus, C : Carbon, DO : Dissolved Oxygen, Temp. : Temperature,
BOD : Biochemical Oxygen Demand, DOM : Dissolved Organic Matter. ** : Flow Field Model(QUAL2E Submodel)

基本 骨格으로 하고, 모형구성의 세분화 및 관련
副模型과의 연계정도에 따라 모의범위 및 한계가
결정된다고 할 수 있다. 모형구성의 세분화 과정은
식물플랑크톤(phytoplankton ; 藻類 또는 엽록소
a 농도로 표현)의 성장·소멸과정을 세분화한 모의
(Bowie, et al., 1985) 및 총인 항목의 세분화
(Hendersen-Sellers, 1984)로 대별될 수 있다.
또한, 호소 수질모형과 관련된 주요 부모형은 흐름
모형, 연직방향 확산모형, 非點汚染源 모형, 지하
수 모형, 流砂移動模型, 강우·유출모형 등이 있으
나, 관련 부모형과의 연계모의 사례는 흐름모형을

제외하고는 미흡한 실정이다(이길성, 조홍연,
1995). 특히, 강우에 의한 일시적인 오염부하량의
증가가 호소수질에 미치는 영향을 적절하게 평가하
기 위해서는 非點汚染源 模型을 활용하여야 한다
(Novotny and Chesters, 1981).

2.2 모의 항목의 반응모식도

호소 수질모형에서 모의하는 항목은 水中에 풍부
한 탄소 및 규조류의 모의에 필요한 규소 항목을
제외한 질소 및 인의 영양염류, DO, COD(또는

BOD) 항목 및 호소 수질모형의 중심이 되는 藻類 등 이다. 각각의 수질항목간 주요 반응은 질소, 인 및 산소 항목의 收支 및 藻類와의 상호작용에 관련된 내용으로 藻類項目이 중심을 차지하고 있다 (Orlob, 1983 ; Fig. 1 참조). 수질항목간 상호작용은 각각의 반응계수로 표현할 수 있으며, 호소 수질모형에서 중요한 반응은 재폭기(re-aeration), 열전달(heat exchange), 입자성 항목의 침전, 미생물에 의한 유기물의 분해(microbial decomposition), 질산화(nitrification) 또는 탈질산화, 무기질화(mineralization) 등의 과정(Jorgensen & Gromiec, 1989)으로 모의 영역에 적합한 반응계수를 선정하여 사용하거나 또는 현장에서 측정된 값을 사용할 수 있다.

2.3 모형의 개발을 위한 모니터링

호소 수질모형의 개발은 대상지역의 기본적인 자료 구축정도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 수질변동 및 오염물 유입양상 등이 地域性을 반영하고 있으므로 모형의 개발에 우선하여 기본적인 자료 (Table 2 참조 ; OECD, 1982)의 측정이 수행되어야 한다. 또한, OECD(1982) 보고서는 호소의 부영양화 모니터링을 위한 물리적, 화학적, 생물학적 변수를 다음과 같이 제시하고 있다. 물리적 변수 : 온도, 전기전도도(염도), 광도 및 투명도 등 ; 화학적 변수 : pH, 용존산소, 질소 및 인, 기타 산화제 등 ; 생물학적 변수 : 식물플랑크톤 및 생산성, 유기탄소 등.

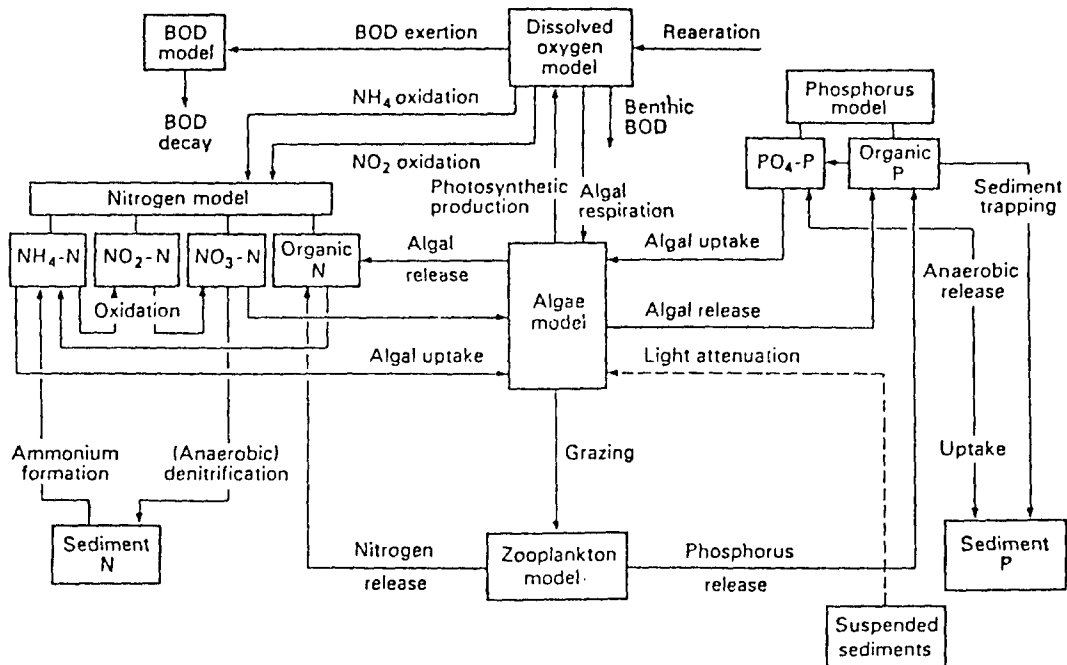


Fig.1 Major Reaction Processes of Lake and Reservoir Water Quality Modeling(Orlob, 1983)

특집 : 우리나라 담수호의 수질환경과 문제점

Table 2. Background Data for Measuring and Monitoring Eutrophication in Inland Waters

Parts	Items
Geographic Data	Latitude and longitude(of the centroid of the water aera). Altitude of the water above sea level(or below) Catchment area(including the area of surface water) General climatic data General geological characteristics, particular nature of bedrock, subsoil and soils, and the importance of land erosion. Description of type of lake. Vegetation, Population Land usage(industrial, urban, agricultural, etc.) Use of water(drinking, sport, fishing, etc.) Sewage and effluent discharge(population and industry)
Morphometric and Hydrologic Data	Surface area of water-length, width(maximum and average), shore length, etc. Volume of water(with information on regulation) Maximum and average depth(by basins if applicable) Location of exceptional depths and the surface area ratio of deep to shallow waters Ratio of epilimnion over hypolimnion Duration of stratification, Nature of lake sediments Seasonal variation of monthly precipitation on drainage basin Inflow and outflow of water(also underground) Water currents, Water renewal time(retention time)
Ecological Data	Bacteria, Phytoplankton, Algal bioassays, Bottom flora Macrophytes, Bottom fauna, Zooplankton, Fish

우리나라의 경우 환경부에서는 호소에 대하여 pH, COD, SS, DO, 대장균군수, 총인, 총질소 항목 및 독성물질, 중금속 항목 등을 측정하고 있으나, 호소수질 및 부영양화 현상과 관련된 조류(엽록소) 항목의 측정이 수행되지 않고 있으며, 영양염류 항목도 세분화된 항목으로 측정이 되지 않고 있다. 또한, 조류의 성장 제한인자인日照時間 및 光度(light intensity)의 측정은 광역에 대하여 기상청에서 수행되고 있는 실정이다. 따라서, 환경부 자료는 전반적인 수질변동 양상을 파악하는데 유용한 것으로 사료되며, 수질모형의 개발·적용 측면에서는 다소 미흡한 것으로 판단된다.

2.4 수질모형 입력자료의 不確實性

모형의 입력자료는 외부입력자료 및 내부 입력자료로 구분할 수 있다. 외부입력자료는 기상학적 입

력자료 및 수리·수문학적 입력자료, 호소로 유입되는 오염물질의 특성 및 부하량 등의 오염물질 정보 등이 있다. 내부입력자료는 모의 수체의 반응과 관련된 항으로 각종 반응계수 및 수체 내에서의 용출 및 소멸과 관련된 항, 모형의 구조와 관련된 계수 등으로 구성된다. 모형의 입력자료의 數는 모형의 세분화 및 복잡도(complexity level)에 따라 기하급수적으로 증가하게 된다. WASP4 모형(Ambrose Jr., et al., 1988)의 경우 복잡도에 따라 모형의 반응과 관련된 입력계수가 2~3개에서 20~30개 정도로 증가하며, WQRRS 모형(Smith, 1978)의 경우 생물학적 인자(底棲生物, 동물플랑크톤, 어류 등)를 포함하여 모형을 수행할 경우 관련 입력자료에 대한 정보 및 활용자료가 부족한 상태에서 모형을 수행하여야 한다. 또한, 모든 입력자료의 측정이 불가능하므로 추정에 의한 입력 및 간략화, 보간, 관계식을 이용한 입력자료의 산정과

정이 불가피하다. 따라서, 모형 입력자료의 불확실성 분석 및 모형결과의 불확실성 및 신뢰도 분석 (Brown & Barnwell, 1987)이 요구되고 있는 실정이다.

3. 水質模型의 開發方向

3.1 模型의 入力資料

보고서 및 문헌(Bowie, et al., 1985 ; Thomann & Mueller, 1987)에 제시된 값을 참조하여 모형의 반응계수 및 구조적 매개변수를 입력하는 기존의 방법은 입력계수가 지역성을 반영하는 경우에는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서, 모형의 반응계수를 현장에서 측정하는 방법 또는 可用한 觀測資料에 의한 모형매개변수의 자동추정(automatic calibration) 방법을 이용할 수 있다. 그러나, 수질모형의 모든 입력자료를 추정, 산정하는 것은 실질적으로 불가능하므로 모형의 입력자료에 대한 정보 및 관계식을 최대한 활용하여 모형 입력자료의 개선을 도모하는 작업은 모형의 信賴度를 증가시키는 중요한 작업이다. 따라서, 모형의 입력자료 각각에 대한 미시적인 연구 및 추정, 민감도 분석은 모형의 구조개선 및 모의한계를 저감하는 중요한 부분을 차지하게 된다.

3.2 副模型과의 連繫(linkage)

수질모형은 주요 부모형으로 흐름모형을 포함하여 흐름에 의한 오염물질의 운송 및 확산을 모의하는 경우가 主流를 이루고 있다. 그러나, 흐름모형을 포함한 관련 副模型과의 연계모의는 학제적인 환경연구에서 매우 중요한 분야이다.

수문학 및 지리정보시스템(GIS) 분야와의 연계를 통한 비점오염원 모형과의 연계, 생물분야와의 연계를 통한 식물플랑크톤-동물플랑크톤-저서생물의 상호작용을 고려한 생태학적 모형으로의 확장, 지질분야와의 연계를 통한 중금속 물질의 장기적인 퇴적량 및 질량평형모형(mass balance model)의

구성, 화학분야와의 연계를 통한 유기화학물질 및 독극물의 사고방류에 의한 운송 및 확산에 관한 연계모의, 지하수 및 대기를 통한 오염물질의 유입기작 모델링, 저층퇴적물의 재부유 및 침전에 의한 연직방향의 오염물 혼합과정 모델링 작업 등 호소수질모형과 관련 부모형과의 연계에 의한 모의범위의 확장 및 기술적인 수준 향상은 통합 수질모형(integrated WQM)의 구성을 위한 방대한 연구분야이다.

3.3 模型의 不確實性 및 信賴度

호소 수질모형의 지배방정식은 이송, 확산, 반응, 용출 및 소멸항을 포함한 運送方程式으로 표현되며(Fischer et al., 1979), 지배방정식의 수치적인 오차 및 불안정성을 저감하기 위한 수치기법, 예를 들면 ELM(Eulerian-Lagrangian Method), QUICK(EST) 방법 등이 개발되어 적용단계에 있으나, 모형의 보정 및 검증에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 檢證을 거치지 않은 수질모형은 모형의 보정과정에서 歪曲될 수 있으며, 향후 호소 수질관리 대책을 수립하는 과정에서 과소 또는 과대평가된 결과 및 잘못된 결과를 유발할 수도 있다. 따라서, 모형의 보정 및 검증과정은 1~2년간의 단기간의 자료가 아닌 장기간의 일관적인 자료에 의한 다각적인 검증과정이 필요하다. 특히, 호소의 개발 및 관리계획 수립을 위하여 장래의 수질을 예측하는 모형은 모형의 검증과정이 필수적이라 할 수 있다. 자료부족에 의한 모형의 "검증절차를 생략한 경우에는 모형의 불확실성 분석을 반드시 수행하여야 할 것으로 사료된다. 모형의 불확실성 분석방법은 민감도분석, 오차분석, Monte Carlo 모의에 의한 자료의 통계적 분석방법 등이 있으며(Brown & Barnwell, 1987), 중요한 연구과제로 대두되고 있다.

4. 結 論

호소 수질모형의 현황 및 문제점을 파악한 결과

특집 : 우리나라 담수호의 수질환경과 문제점

향후 호소 수질모형의 개발방향은 다방면으로 다양하게 제시될 수 있다. 그러나, 가장 중요한 사항은 호소 수질모형의 개발이 수질자료의 데이터베이스 구축작업과 병행되어야 하며, 해당지역에서 모형의 보정 및 다각적인 검증절차를 완료한 수질모형을 구축·활용하고, 추가되는 수질자료를 활용하여 점차적으로 개선·보완하는 과정이 지속적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다. 좁은 의미의 부영양화 현상을 모의하거나 성층화 현상을 모의하는 정도의 수질모형은 기본적인 골격 개발이 완료된 상태로 사료된다. 그러나, 호소의 수질은 영향을 미치는 인자가 방대하므로 統合 水質模型의 구성은 방대한 작업에 해당한다. 따라서 그 지역의 특성에 적합한 주요 부모형과의 연계모의에 의한 지역 수질모형을 구축하는 작업이 필요할 것으로 사료되며, 이를 위한 관련 연구결과를 최대한 활용하는 방향으로 모형이 통합화 되어야 한다.

참 고 문 헌

이길성, 조홍연(1995.4). 貯水池 수질모델링. 한국수자원학회지, 기술정보, 제28권, 제2호, pp.71-76.
 조홍연, 이길성(1995.9). 직교곡선격자를 이용한 수질 모형의 개발 및 적용, 대한토목학회논문집, 제15권, 제5호, pp.1311-1322.
 Ambrose Jr., R.B., Wool, T.A., Connonly, J.P. and Schanz, R.W.(1988). WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model : Theory, User's Manual, and Programmers Guide. EPA/600/3-87/039, EPA
 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.(1985). Rates, Constants, and Kinetics Formualtions

in Surface Water Quality Modeling(2nd Ed.), EPA/600/3-85/040. Tetra-Tech.
 Brown, L.C. and Barnwell, T.O.(1987). The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS : Documentation and User Manual. EPA/600/3-87/007. EPA
 Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J. and Brooks, N.H.(1979). Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press.
 Hendersen-Sellers, B.(1984). Engineering Limnology. Pitman Advanced Pub. Program, Part.3.
 James, A.(Editor)(1993). An Introduction to Water Quality Modelling(2nd Ed.), John-Wiley & Sons.
 Jorgensen, S.E. and Gromiec, M.J.(Editors). (1989). Mathematical Submodels in Water Quality Systems, Developments in Environmental Modeling, 14, Elsevier.
 Novotny, V. and Chesters, G.(1981). Handbook of Nonpoint Pollution : Sources and Management, VNR Environmental Eng. Series, Van Nostrand Reinhold.
 OECD.(1982). Eutrophication of Water : Monitoring, Assessment and Control. Organisation for Economic Cooperation and Development.
 Orlob, G.T.(1983). Mathematical Modeling of Water Quality : Streams, Lakes, and Reservoirs. John-Wiley & Sons.
 Smith, D.J.(1978). Water Quality for River-Reservoir Systems : WQRRS. HEC.
 Thomann, R.V. and Mueller, J.A.(1987). Principles of Surface Water Quality Modeling and Control. Harper & Row. ☞