

貯水池 水質모델링

李 吉 成* · 趙 烘 釐**

1. 서 론

수자원 장기종합개발계획(건설부, 1990)에 의하면, 증가하는 용수수요 대처방안은 댐 건설[취수지역의 확보]에 의존하고 있으며, 용수공급을 위한 수자원 개발사업이 활발하게 추진되고 있다. 댐 건설로 확보된 수자원은 생활용수[飲用水], 農·工業用水, 하천유지용수 및 發電用水로 이용되므로, 사용용도에 부합되는 양적·질적 요구조건을 기본적으로 만족하여야 한다. 즉, 水量과 水質側面에서 용도별 요구조건[水質基準]을 만족하는 수자원을 開發·維持·管理하여야 하며, 주변의 환경을 汚染可能性 및 汚染物量의 관점에서 고려하여야 한다. 따라서, 각종 汚染物이 유입되는 저수지의 수질관리[적정수준의 수질유지] 및 국민의 생활환경[휴식공간 및 위락시설] 요구수준에 부합되는 수질·수량유지 및 개선대책을 수립하여야 한다.

적절한 수질관리대책은 수계 및 수역의 장·단기 오염물발생량의 예측, 오염물 처리시설계획, 환경변화에 따른 수질변동 예측 등 방대한 분야의 내용을 근거로 하여 수립되어야 한다. 특히, 용수공급 창고로서의 역할을 하는 호소 및 저수지의 將來 水質變動을 예측하기 위한 수질모델링은 수질관리 측면에서 중요한 부분을 차지하고 있다. 본 論考에서는 既存의 저수지 수질모델링의 사례 및 문제점을 검토하고, 향후 연구과제[개선점] 및 수질모델링의 방향을 수립하는 지침을 제시하고자 한다.

2. 수질모델링의 연구현황

수질모델링은 수질모형의 개발 및 적용(모형의 보정 및 검증·적용) 등의 단계적 과정에 해당하며, 일반적으로 모형이 모의하는 현상에 따라 물리·화학·생물학적 모형으로 분류할 수 있다(표 1 참조; James, 1993).

통상적인 저수지 수질모형(또는 湖沼[湖水]水質模型)은 화학·생물학적 모형에 해당하며, 물리적인 모형 중 흐름모형은 수질모형의 수리학적 입력 자료를 제공하는 중요하고 기본적인 副模型에 해당한다. 본문에서 언급하는 저수지 수질모형은 수질모델링의 중심이 되는 富營養化 模型[부영양화와 관련된 수질항목 모의모형]이며, 수질모형의 외부 환경인자(입력자료)를 제공하는 모형은 수질모형과 관련된 부모형으로 취급한다. 저수지 수질모형은 방대한 유역면적, 지형적 특성, 수리·수문학적 특성, 오염물의 종류 및 유입·혼합 특성과 관련 [부모형과 연계관계]되어 있다. 오염과 관련된 현상을 모의하여 수질모형의 입력자료를 제공하는 주요 副模型은 흐름모형, 온도구조(온도성층)모형, 非點汚染源 모형, 流砂移動模型, 오염물 확산모형, 毒性化學物質 및 重金屬移動模型, 수질관리모형 등으로 구성된다(그림 1. 참조).

저수지 수질모형은 부영양화 현상에 중점을 두고 개발이 추진되어 왔으며(Hendersen-Sellers, 1984), 부영양화를 유발하는 主 영양염류인 磷模

* 서울대학교 토목공학과 교수

** 한국해양연구소 박사후 과정

표 1. 호소 수질모형의 구분(James, 1993)

모형의 형(type)	모의현상	주 목적(main aim)	
		계 획	운 영
물리적 모형	온도(수온의 공간분포)	✓	✓
	에너지분포(thermal structure)	✓	✓
	흐름모형(유체동역학)	✓	✓
화학적 모형	오염물 총량 평형 (mass balance loading)	✓	
생물학적 모형	富營養化(eutrophication) 毒性(toxicity)	✓ ✓	✓

(✓ : 통상적으로 적용되는 모형의 형태)

표 2. 국내에서의 수질모델링에 관한 연구

분 류	연구자(연도)	내용(적용모형 등)
모형의 적용	심순보 등(1984)	WQRRS 모형-한강 본류
	김성순, 김양섭(1985)	鱗모형-충주호
	최홍식, 이길성(1987)	QUAL II-금강수계
	안태홍(1988)	QUAL2E-한강본류
	김중성(1989)	QUAL2E-충주호 유입지천
	김원만 등(1990)	WASP4-팔당호(6개 구획)
	김일규(1990)	부영양화 예측모형 비교분석
	황인성(1991)	WASP4-팔당호(13개 구획)
	김정욱, 이종호(1991)	LARM 형(연직 2차원 모형)-대청호
	이성기 등(1993)	QUAL2E-영산강 하구
	조홍연 등(1993)	WASP4-팔당호(45개 구획)
조홍연(1994)	평면 2차원 모형-팔당호(1036 Cells)	
모형 매개변수의 추정	건설기술연구원(1987)	QUAL2E(Gauss-Newton 방법 등)
	최홍식, 이길성(1989)	Streeter-Phelps 모형(유량의 함수)
	전경수, 이길성(1993)	QUAL2E(영향계수법)
	조홍연 등(1993)	WASP4(시행착오법)
	조홍연(1994)	평면 2차원 모형(영향계수법)

형을 根幹으로 하여 보다 세분화된 영양염류 항목 및 底面堆積物의 영향을 모의하는 모형으로 확장되어 추진되고 있다. 또한, 湖沼·하천·하구 및 해양에 적용할 수 있는 多次元模型으로의 개발도 추진되고 있다. 초기의 저수지 수질모형은 주로 연직방향의 層模型(layer model)으로 부영양화[營養狀態] 예측을 중심으로 연구가 추진된 반면, 하천수질모형은 BOD, DO 항목에 중점을 두고 추진되었으나, 통합된 모형으로의 개발이 지속적으로 수행되고 있다.

汎用的인 수질모형은 DOSAG 계열모형, WQRRS 모형, QUAL 계열모형(Brown & Barnwell, 1987), WASP 계열모형(Ambrose et al., 1988), 鱗模型(Seo, 1991) 등이 있으며, 모형의 지배방정식은 주로 무차원(상미분방정식으로 표현됨) 또는 1차원(단면평균 또는 표면적평균 편미분방정식) 질량보존방정식으로, 계산구역은 구획 또는 구간으로 분할된 형태이다. 국내에서의 수질모델링은 既開發模型을 통하여 대부분 수행되었으며(표 2. 참조), 多次元 모형의 개발 및 모형의

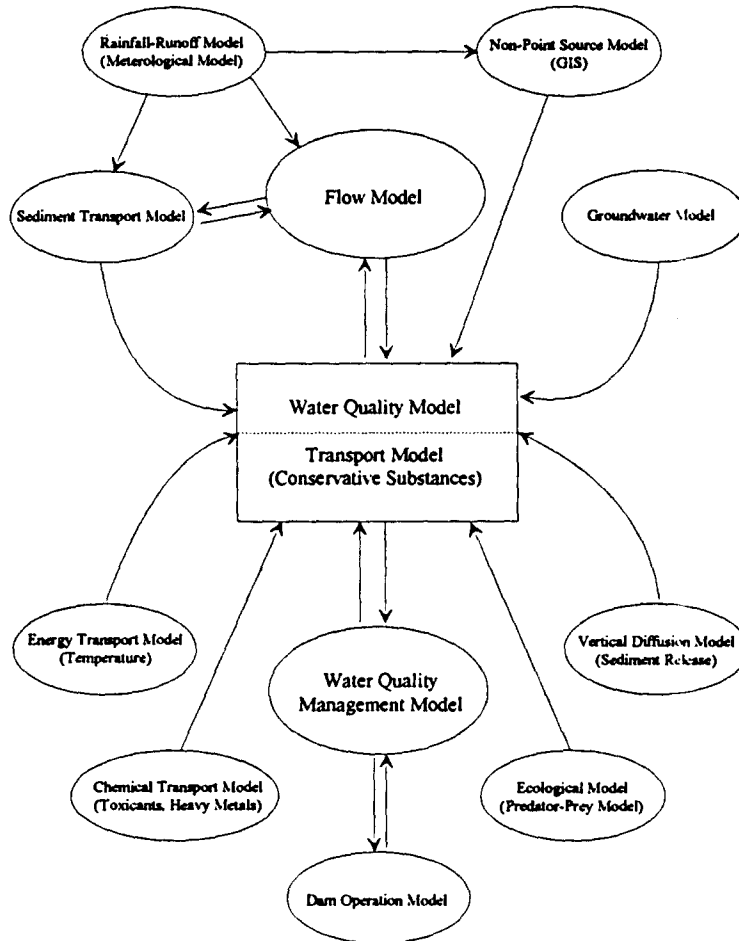


그림 1. 수질모형 및 관련 부모형의 연결관계

적용사례는 미흡한 실정이다(조흥연, 1994).

3. 수질모델링의 문제점

3.1 副模型의 검토

일반적으로 저수지는 방대한 流域面積(watershed)을 가지고 있으므로 오염양상 및 오염인자, 오염물의 특성 및 분포·혼합양상에 있어서도 매우 복잡하고 지역성을 반영하는 거동을 보이고 있다. 유기물 유입에 따른 오염물 농도분포 및 영양염류

의 과도한 유입으로 인한 부영양화 현상 등의 수질 변동을 예측하기 위해서는 관련된 부모형 및 가용 자료를 이용한 모형 입력자료의 적절한 결정이 선행되어야 한다. 따라서, 모형 적용지역의 특성에 따른 적절한 부모형을 선택하여 수질모형과 연계운영하는 수질모델링이 요구된다. 既開發된 수질모형은 관련 부모형을 1-3개 정도 포함하고 있는 경우가 있으므로, 모형의 적용시 부모형의 검증 및 연계성에 대한 검토가 수행되어야 한다.

표 3. 조류의 성장·쇠퇴에 영향을 미치는 인자(Henderson-Sellers, 1984)

성장국면(Growth Phase)	소멸국면(Recession Phase)
수온의 증가	자연사멸(depletion)
광도(light intensity)의 증가	동물성 플랑크톤 攝食 증가
영양염류의 유입	Self-shading(빛 제한)
동물성 플랑크톤의 감소	박테리아의 사멸
침강속도의 저하	수온의 감소
	침강속도의 증가 및 顛倒

3.2 水質反應模型的 構造

藻類의 이상성장으로 유발되는 일시적인 부영양화 현상은 과도하게 유입되는 영양염류 및 藻類의 種(species)에 따라 다르게 나타나므로, 모형의 구조 및 입력자료의 요구수준도 다르게 된다. 硅藻類에 의한 부영양화 현상을 모의하기 위해서는 硅素(Si)項目의 관측이 필수적이며(OECD, 1982; Thomann & Mueller, 1987), 窒素(N) 및 磷(P)項目, 光度[日射量] 및 日照率 등의 환경자료가 필요하다. 기존의 수질모형은 藻類를 하나의 대표 種으로 취급하는 접근방식[엽록소 a 농도로 조류의 농도를 표현]을 채택하고 있으나, 일시적으로 발생하는 赤潮 및 藻類의 異常增殖을 적절하게 모의하기 위해서는 藻類의 種 및 細部 반응미케니즘을 고려한 접근방식(적절한 수질항목의 반응구조를 구성)으로 수치모델링을 수행하여야 하며, 藻類의 성장 및 소멸에 영향을 미치는 인자(표 3. 참조)의 측정을 수반하여야 한다. 따라서, 기존의 수질반응모형의 구조는 적용영역에 대하여 반응양상의 적절한 반영여부, 현상의 적절한 모의 가능성 등을 검토하여야 하며, 부적절한 경우 모형의 반응구조를 수정하여야 한다.

4. 수질모델링의 연구내용 및 방향

4.1 흐름모형-수질모형 연계모의

저수지 수질모델링에 있어서 가장 중요한 副模型

인 동력학적 모형, 즉 흐름모형은 대상영역의 흐름을 적절하게 규명할 수 있는 정도로 개발되어 있으나, 수질모형과의 連繫에 관한 부분이 중요하다. 모의하는 수질항목의 시간척도(흐름과 수질항목의 반응), 공간척도 등을 고려한 連繫模擬를 추진하여야 한다. 따라서, 수질모형의 複雜度에 맞는 동등한 수준의 흐름모형을 선택하여야 한다.

4.2 수질모형-부모형 접속

수질모형과 관련 부모형(그림 1. 참조)은 각각 별도의 개발과정을 경유하기 때문에 모형간의 적절한 접속과정이 필요하다. 모형간의 접속은 단순한 계산결과와의 교환만이 아닌 모형의 특성, 적용범위(시·공간척도), 모형구조 및 구성의 기본가정 등을 비교하여 일관성있고, 적절한 모형접속을 추진하여야 한다. 非點汚染源 모형의 경우에는 側面境界의 分散된 汚染源으로 판단하여, 플럭스 경계조건인 측면에서 접속을 시도하여야 하며; 流砂移動模型은 오염물의 침강, 퇴적 및 再浮游 과정에 의한 연직방향 이동 및 内部汚染源으로 간주하여 모형을 접속하는 시도를 하여야 한다. 그리고, 비교적 개발이 미흡한 독극물 이동모형 및 생태학적 모형(ecological model)의 구성은 각각 단기적·장기적인 수질모의와 관련된 모형으로, 기상상태 및 장기 오염양상에 따라 일반적인 수질항목에 비하여 그 변화양상이 매우 느린 모형이므로 장기적인 관측 및 일시적인 관측자료와 병행하여 구성하여야 한다.

4.3 모형의 複雜度 선택

최적모형의 선택과 관련된 부분으로, 단순한 모형은 현상규명에 한계가 있고 보다 세분화된 모형은 입력자료 및 검증자료에 많은 제약이 있으므로 불확실성에 의한 오차확대가 예상된다. 따라서, 가용자료를 최대한 활용할 수 있는 범위에서 모의 수질항목 및 모형수행의 복잡도를 선택하여야 한다. 모형의 오류 및 불확실성 분석은 중요한 부분으로 대두되고 있다. QUAL2E-UNCAS 모형(Brown and Barnwell, 1987)은 수질모형의 오차, 불확실성 및 민감도 분석을 수행할 수 있는 모형으로 可用資料에 따른 모형의 複雜度를 선택하는 지침을 제공하는 유용한 모형이며, 추정 매개변수의 선정 기준으로 활용할 수 있다.

4.4 지역성을 고려한 반응모형

수질모형을 구성하는 매개변수 및 오염도 지표항목은 지역적인 특성을 반영하므로(Bowie et al., 1985), 해당지역의 수리·수문학적 특성, 기후특성, 오염원 유입특성 등에 대한 자료조사 및 해당수계의 自淨能力·반응특성, 용출률 및 소멸률, 계절적인 특성 등에 대한 자료분석이 필요하다. 따라서, 지역성을 반영하기 위해서는 반응모형의 구조를 유연성(flexibility)있게 구성할 필요가 있다. 그러나, 지역성을 파악하기 위한 선행작업은 대상지역 또는 오염 영향권으로 판단되는 水系의 水質資料 構築이 선행되어야 한다.

5. 결론 및 건의사항

보다 효율적인 저수지 수질관리를 위하여, 향후 저수지 수질모델링은 다음과 같은 내용에 유의하여 연구·추진되어야 할 것으로 판단된다.

수질모형의 매개변수는 지역성을 고려하여 추정하여야 한다. 지역적인 특성을 반영하는 인자는 모형의 보정에 의존하여 추정할 수 있으나, 추정시 지역적인 구분을 통한 분산 매개변수로 추정하여야 한다. 또한, 타문헌에서 제시된 매개변수를 사용하

는 경우 지형적인 상사성을 고려하여 선택하여야 한다.

기존의 수질모형이 가진 흐름장 모형의 취약점을 개선한 격자모형의 개발 및 既開發 흐름모형과의 접속이 필요하며, 모형간의 時·空尺度의 차이를 고려하여 연계모의를 수행하여야 한다. 또한, 오염사고 등 오염물 확산에 대한 豫·警報시스템을 구성하기 위하여, 實時間 豫測模型[동적모형]의 개발 및 검증이 필요하다. 개발된 모형은 취수장의 취수 중단기간 및 오염물 제거대책 수립의 지침을 제공하여야 하므로 모형의 현장 적용성이 입증된 후 수행하여야 한다. 우리나라의 경우 미흡한 수질자료로 인하여 동적 수질모형을 다각적인 측면에서 검증한 사례는 전무한 실정이다. 한편, 개발된 모형의 보정 및 검증, 현장적용을 위한 필수작업을 위하여 다각적인 방향의 수질자료 구축이 필요하며, 수질자료의 데이터베이스화 작업이 필요하다. 수질자료는 장기적인 측면에서 지속적이고, 일관성있게 측정되어야 한다.

참 고 문 헌

- 건설기술연구원(1987). PC용 하천수질관리 모형의 개발(I)-반응계수에 대한 연구를 중심으로-, 전기연, 87-EE-113.
- 건설부(1990). 수자원장기종합계획(1991-2011).
- 김성순, 김양섭(1989). 호수의 영양상태 예측에 관한 연구, 한국상하수도학회지, 제1권, 제2호, pp. 27-32.
- 김원만 등(1990). 팔당호 시험준설 영향조사 보고서. 한국수질보전학회, 환경처.
- 김일규(1990). 저수지 부영양화 모형의 비교분석에 관한 연구. 서울대학교 대학원, 공학석사 학위논문.
- 김정욱, 이종호(1991). 댐호의 2차원 수질예측기법에 관한 연구, 대한환경공학회지, 제13권, 제4호, 대한환경공학회, pp. 267-275.
- 김종성(1989). 충주호 유입지천에 대한 QUAL2E 모형의 적용에 관한 연구. 서울대학교 환경대학원, 석사학위논문.
- 심순보, 이광호, 유병로(1984). 하천수질예측 Model (I)-WQRRS Model에 의한 한강 하천수질예측-, 한국수문학회지, 제17권, 제1호, pp. 31-36.

- 안태홍(1988). QUAL2E 모형을 이용한 한강분류 수질의 예측 평가에 관한 연구, 서울대학교 환경대학원, 석사학위논문.
- 이성기, 유태종, 강인숙(1993). 영산호 수질예측에 관한 연구, 한국상하수도학회지, 제6권, 제2호, pp. 15-24.
- 전경수, 이길성(1993). 영향계수를 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정. 대한토목학회논문집, 제13권, 제4호, pp. 163-176.
- 조홍연(1994). 좌표변환에 의한 2차원 수질모형의 개발 및 적용. 서울대학교 대학원, 공학박사 학위논문.
- 조홍연, 전경수, 이길성(1993). WASP4 모형에 의한 수질모델링, 한국해양 해양공학회지, 제5권, 제3호, pp. 221-231.
- 조홍연, 전경수, 이길성, 한광석(1993). WASP4 모형의 매개변수 추정 : 팔당호를 중심으로, 대한토목학회논문집, 제13권, 제4호, pp. 177-188.
- 최홍식, 이길성(1987). QUAL II 모형의 금강수계에의 적용. 한국상하수도학회지, 제1권, 제2호, pp. 20-33.
- 최홍식, 이길성(1989). Streeter-Phelps 모델의 최적계수 추정, 한국상하수도학회지, 제2권, 제1호, pp. 19-26.
- 황인성(1991). 생태학적 모형을 이용한 팔당호의 수질 분석과 모형의 감응도 분석, 서울대학교 대학원, 공학석사 학위논문.
- Ambrose Jr., R.B., T.A. Wool, J.P. Connonlly, and R.W. Schanz(1988). WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model Theory, User's Manual, and Programmers Guide. EPA, EPA/600/3-87/039.
- Bowie, G.L., W.B. Mills, D.B. Porcella, C.L. Campbell, J.R. Pagenkopf, G.L. Rupp, K.M. Johnson, P.W.H. Chan, and S.A. Gherini (1985). Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling (2nd Ed.). Tetra Tech, EPA/600/3-85/040.
- Brown, L.C., and T.O. Barnwell.(1987). The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS:Documentation and User Manual. EPA, EPA/600/3-87/007.
- Henderson-Sellers, B.(1984). Engineering Limnology. Part 3, Pitman Advanced Pub. Program.
- James, A.(Editor)(1993). An Introduction to Water Quality Modelling(2nd Ed.). John-Wiley & Sons, Chap.9.
- OECD.(1982). Eutrophication of Waters Monitoring, Assessment and Control. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Seo, D.I.(1991). Optimal Complexity Analysis of Total Phosphorus. Ph.D. Thesis, Univ. of Michigan.
- Thomann, R.V., and J.A. Mueller(1987). Principles of Surface Water Quality Modeling and Control. Haper & Row.