

# 하천수질 모델링의 이론과 적용

한 건 연 (경북대학교 토목공학과 교수)

## 1. 수질모델링에 관한 일반사항

수자원의 효율적인 수질관리를 위해서 수질모델링은 하천, 저수지/호소, 하구부 등에서의 수자원 수질 시스템을 해석하는 분야, 다양한 관리대안 하에서의 수질반응을 조사하는 분야, 장래 수질을 예측하고 관리하는 분야 등에서 널리 적용되고있다. 하천, 저수지, 하구부로 유입되는 오염물질을 통제하고, 과학적으로 관리하기 위해서는 수자원 기술자들이 수질모델링 과정을 정확히 이해하고 관련모형을 적용하여야 하겠다. 최근에는 하천, 호소에서의 BOD-DO 해석뿐만 아니라 질소, 인 등의 영향을 고려한 富營養化 해석, 시간변동성을 고려한 비정상 수질해석, 2차원 및 다차원 수질해석, 수질에 대한 불확실도 검정 등 다양한 수질모의 결과가 사회적으로 요구되고 있는 시점에서, 이에 대한 체계적인 기술축적과 새로운 관련기술의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

수질모델링은 크게 확정론적 방법과 추계학적 방법으로 구분할 수 있다. 확정론적인 모형은 물리적인 법칙과 초기·경계조건 및 입력의 정량적인 표현 등에 기초한 이론적인 구조를 가지고 있다. 모형에 관련된 조건들이 적절하게 기술되었을 때 확정론적 모형의 결과는 정확해야하나, 대부분의 경우 수질문제의 복잡성 때문에 완벽한 모형은 실질적으로 불가능하다.

일반적으로 단순화, 기본가정, 근사화과정 등이 계산결과에 도입되기 때문에 확정론적 모형으로부터 얻게되는 해는 어느 정도의 불확실도를 가지게 된다. 그

림 1은 일반적인 수질모델링과정을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 수자원의 효율적인 수질 관리를 위하여서는 오염원을 조사하여 오염부하량을 분석하여야 하고, 하도 구간에서의 수리, 수문 특성을 조

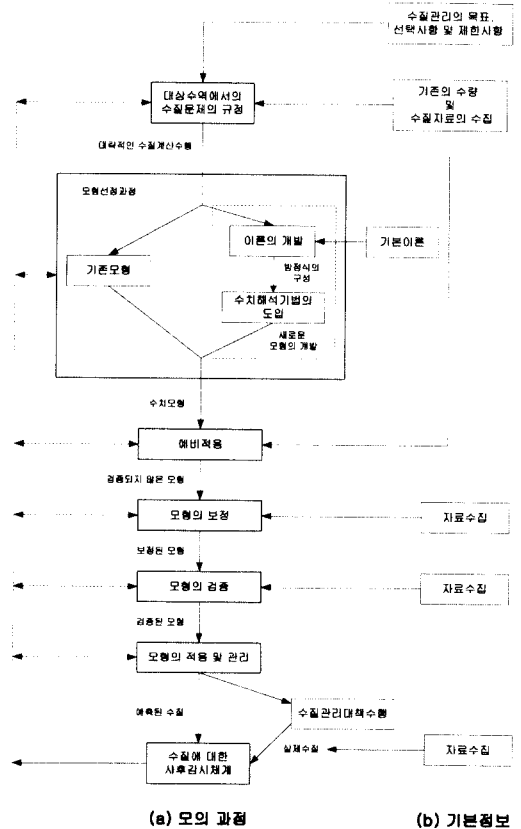


그림 1. 하천수질 모델링의 일반적인 과정

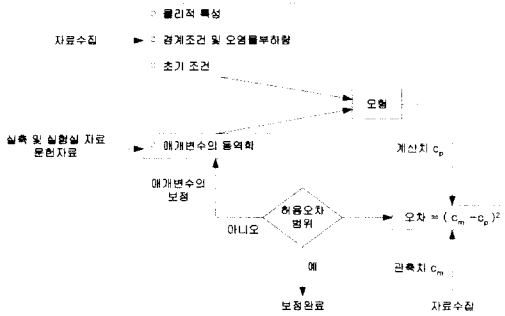


그림 2. 수질모형의 보정 및 검증과정(Chapra, 1997)

사 분석하여 하도 내에서 흐름해석을 실시하여야 한다. 또한, 오염물 배출이 하천 수질에 미치는 영향을 확률론적 방법으로 해석하고 이를 실측치와 비교·검토하여야 한다. 마지막 단계에서는 수질해석 결과를 이용하여 대상 하천구간에서 수자원 용도에 따른 적절한 수질목표 기준을 수립하고, 목표하는 수질 기준을 달성하기 위하여 주요 오염원 및 지류로부터의 오염농도를 효과적으로 규제하기 위한 최적의 수질관리 방안을 다양한 최적화 기법과 추계학적 기법에 의하여 수립하여야 할 것이다.

수질모형의 적용과정에서 중요한 내용은 그림 2에서 나타난 바와 같은 모형의 보정과 검증과정이다. 모형의 보정은 실측자료를 적용하여 모형에 포함된 각종 반응계수를 추정하는 작업을 의미하며, 모형의 검증은 보정된 반응계수를 다른 조건하에서 적용성을 증명하는 것이다.

## 2. 하천수질모의

하천수질 모의를 위한 기본사항으로서 그림 3은 유기물질의 생성 및 분해와 관련된 생물권을 나타낸 것이다. 태양에 의해서 독립영양 생물체(주로 식물)는 단순한 무기영양물질을 더욱 복잡한 유기분자로 변환한다. 광합성에 의해서 태양에너지는 유기분자 내에서 화학에너지의 형태로 저장된다. 또한 산소는 유리되고, 이산화탄소는 소비된다. 그 다음으로 유기물질은 종속영양 생물체(박테리아나 동물)에 대해서 에너

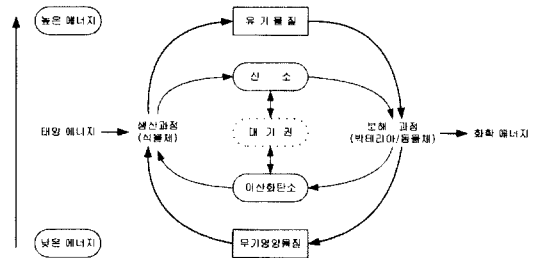
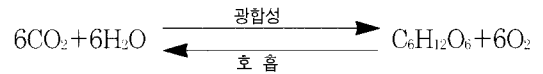


그림 3. 유기물질의 생성 및 분해과정

지원이 되어 호흡과 분해과정을 거치게 된다. 이 과정은 유기물질이 단순한 무기상태로 변환되며, 산소가 소비되고 이산화탄소가 유리된다. 이 과정은 다음과 같은 단순한 화학방정식으로 표시될 수 있다.



이제 폐수유입이 존재하는 하천구간에 대해서 환경과 관련된 생성/소멸의 양상을 살펴보자. 만일 하천이 원래 오염되지 않는 상태라면 오염물 유입 이전의 용존산소 수준은 포화상태에 가까울 것이다. 처리되지 못한 하수의 유입은 용존 또는 고형 유기물질의 오염도를 증가시킬 것이다. 이것들은 두 가지 영향을 가진다. 첫째는 고형물질은 물의 탁도를 증가시킨다. 따라서 태양빛이 수체 내로 침투되지 못하고, 식물성장이 억제된다.

고형물의 일부는 하수유입부의 하류부로 침전되어 슬러지로 된 하상을 형성하고 유독한 냄새를 발생한다(그림 4(a)). 둘째로 유기물질은 종속영양생물체에 먹이를 제공한다. 따라서 그림 3에서의 오른쪽 순환이 지배적이 된다. 많은 분해 생물체가 수체 내에 유기물질을 분해하고 그 과정에서 용존 산소를 다량 소모하게 된다. 더욱이 유기물질의 분해는 슬러지 하상에서도 발생하고, 하상산소 요구량이 수체 내의 분해과정에 추가된다.

용존산소가 감소하면 용존산소 부족량을 보충하기 위해서 대기중의 산소가 수체 내로 포기된다. 유기물질이 분해되고 용존산소 농도가 떨어져서 용존산소의 결핍량과 재포기량이 평형상태에 도달하게 된다. 이

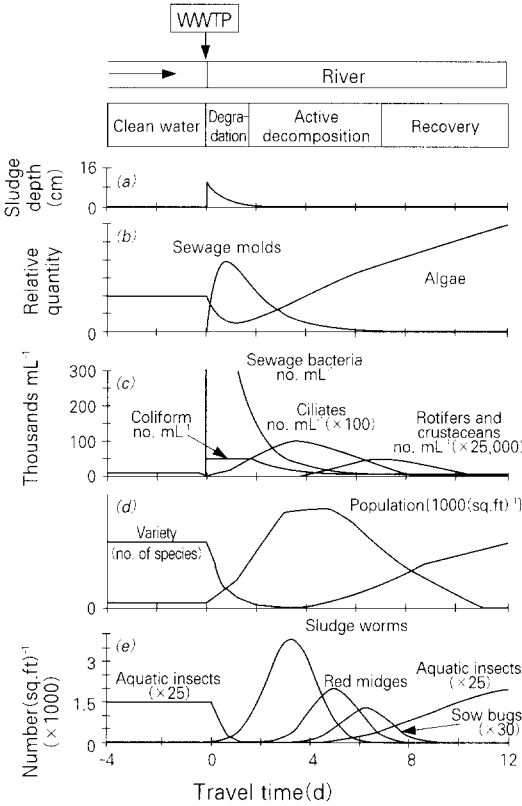


그림 4. 유기물질의 생성 및 분해과정

지점이 용존산소 농도가 최저점 또는 한계점에 도달한 상태이다. 이 지점을 지나면 재포기가 지배되고 용존산소농도는 회복하기 시작한다.

회복지대에서는 하수로 유입된 고형물질의 상당부분이 침전하였으므로 물은 깨끗해진다. 또한 분해과정동안 유리된 무기영양물질이 높게 된다. 결과적으로 회복지대는 때로는 식물의 성장에 영향을 받게 된다. 따라서 그림 3에서의 왼쪽 순환이 지배적으로 된다. 화학적 변화를 지나서, 하수는 생물의 영향을 크게 받게 된다. 그림 4(b),(c)에서와 같이 사상균과 박테리아가 폐수 유입부에서는 지배적이다. 추가적으로 박테리아 그 자체는 ciliates, rotifers와 crustaceans로 구성되는 일련의 생물체에 대한 먹이 공급원이 된다. 폐수 유입 하류의 감소 및 활발한 분해지대에서는 고등생물의 다양성이 급격히 떨어진다. 동시에 그림

4(d)와 같이 전체 생물체의 수는 증가되며, 회복이 이루어짐에 따라 이러한 경향을 역전된다.

### 3. 이용가능한 하천수질모형

하천수질 모형은 오염부하의 삭감계획과 유역에서의 일일 최대 허용부하 등의 환경평가, 살충제나 유해 폐기물에 대한 위험평가 및 저수지 운영에서 중요한 요소이다. 지표수 수질 모형은 수역 전반에 걸쳐 수질 모의를 행하는 遠域 모형과 近域에서의 회석과정을 모의하는 혼합영역 모형으로 크게 나뉜다. 원역 수질 모형은 더 나아가 수역의 종류에 따라 나눌 수 있다. 하천, 호소와 저수지, 감조하천을 포함한 하구 등이 그 예이다. 어떤 모형은 다양한 수역에 대해 적용될 수 있으므로 이것들을 같이 고려하기도 한다. 본 고에서는 일반에 공개되어 있는 열 한가지 수질모형을 요약 정리하였다 (Armrose 등, 1996). 이 모형들은 통상적으로 고려되는 수질 뿐 아니라 독성 오염물까지 포함하며, 정적 1차원에서 동적 다차원 해까지 많은 부분을 다룬다.

#### (1) QUAL2E

Enhanced Stream Water Quality 모형인 QUAL2E와 QUAL2E-UNCAS(Brown과 Barnwell, 1987)는 정적상태에서 수치상 하천시스템에 대한 다양한 수질을 모의할 수 있다.

이 모형은 1차원이며 흐름방향 이송-확산 질량수송식과 반응조건식에 대해 유한차분법을 사용한다. QUAL2E는 용존산소량, 생화학적 산소요구량, 수온 및 영양물질, 유기물질에 의해 영향을 받는 식물성 플랑크톤의 동역학을 예측할 수 있다. 이 모형은 전처리, 후처리 및 민감도와 불확실도 해석을 용이하게 하는 부분들로 구성되어 있다. QUAL2E는 EPA(미국 환경보호청)에서 구할 수 있다.

#### (2) SMP TOX3

Simplified Method Program - Variable Complexity Stream Toxics 모형 (SMP TOX3)은

독성물에 대한 오염 부하를 할당하는 대화식 컴퓨터 프로그램이다. 이 정적 1차원, 흐름방향 모형은 강과 하천의 점오염원에서 기인하는 수주와 하상에서의 부유물질과 용해 및 입자상태의 독성물 농도를 계산한다. 이 모형은 자료입력과 그래프 출력, 민감도 분석과 불확실도 해석을 다루는 사용자에게 친숙하도록 구성되어 있다. SMP-TOX3는 EPA에서 구할 수 있다.

### (3) HSPF

Hydrological Simulation Program-FORTRAN (HSPF)은 통상적인 오염물과 독성 유기오염물을 해석하기 위해 유역 수문학과 수질을 모의하기 위한 광범위한 모형이다. HSPF는 유역모형을 1차원 하천상태의 반응과 유동을 포함하는 유역축척 구조로 통합시킨다. 몇 가지 동수역학적 추적과정에 대한 선택사용이 가능하다. 일반적인 수질 모의는 DO, CBOD, 수온 및 영양물질과 유기물질에 의해 영향을 받는 식물성 플랑크톤 동역학을 예측한다. 독성물질에 대한 모의는 유기화합반응 동역학을 하상 퇴적층의 상부와 그 위에 놓여 있는 수주 내에 용해되거나 흡착된 화학물의 농도를 예측하는 침전균층 알고리즘을 결합시킨다. HSPF는 EPA에서 구할 수 있다.

### (4) WASP5

Water Quality Analysis Simulation Program, WASP5는 지표수 내의 수질과 오염물의 반응과 유동을 모의하는 일반화된 다종의 모형구조를 가진다. 이 모형은 동적이고 1, 2, 3차원 모두에 적용이 가능하다. 두 가지 중요한 구성 모형이 WASP5와 함께 제공된다. 즉, 독성물 해석 부분인 TOXI5는 유기화합반응에 관한 동역학을 퇴적층과 그 상부의 수주 내에 용해되거나 흡착된 화학물의 농도를 예측하는 간단한 퇴적형 알고리즘과 결합시킨다. 용존 산소/부영양화 해석부분인 EUTRO5는 용존산소, 탄소성 생물화학적 산소요구량, 영양물질과 유기물질에 의해 영향을 받는 식물성 플랑크톤 동역학을 예측한다. 오염물 운송은 제시된 흐름조건이나 다른 동수역학 모형과 연

계를 이용해 처리할 수 있다. WASP5는 EPA에서 구할 수 있다.

### (5) EXAMS II

Exposure Analysis Modeling System(EXAMS) II는 사용자가 화학물과 생태계의 특성을 지정하고 저장할 수 있게 해주고 간단한 명령들을 통해 수정할 수도 있으며, 신속한 평가를 수행할 수 있고 합성 유기화학물에 대해서 있을 수 있는 수중 반응구조의 오류 분석할 수 있게 해주는 대화식 모의 시스템이다. 그 해는 정적이거나 동적일 수 있으며, 1, 2, 3차원 모두에 적용이 가능하다. EXAMS는 화학물 부하량, 유동 및 변형을 질량보존의 법칙을 근거로 하는 미분방정식에 조합할 수 있다. 이 모형은 대화식이고 자료입력과 그래프 출력, 표 출력을 다루는 명령을 가지고 있다. EXAMS II는 EPA에서 구할 수 있다.

### (6) CE-QUAL-RIV1

미 육군공병단 수리시험소(WES)에서 개발한 흐름을 위한 동수역학과 수질해석모형인 CE-QUAL-RIV1은 여러 수리구조물을 포함하는 1차원 수지형 하천 시스템에 적용할 수 있다. 이 모형은 동역학적 흐름조건 하에서 용존산소, 생물화학적 산소요구량 및 영양물질과 유기물질에 의해 영향을 받는 식물성 플랑크톤 동역학을 예측한다. CE-QUAL-RIV1은 WES에서 구할 수 있다.

### (7) CE-QUAL-W2

미 육군공병단 수리시험소의 동수역학과 수질해석 모형인, CE-QUAL-W2는 저수지나 좁은 하구부 등의 성층화된 수체에 대한 동적 2차원(길이-수직) 모의를 할 수 있다. 이 동수역학과 수질해석은 직접적으로 연계가 가능하며 이로 인해 수온, 염도 및 입자 농도로부터 계산된 변화하는 물의 밀도는 흐름의 예측에 영향을 미친다. 이 모형은 용존산소와 영양물질과 유기물질에 의해 영향을 받는 식물성 플랑크톤 동역학을 모의한다. CE-QUAL-W2는 WES에서 구할 수 있다.

(8) CE-QUAL-ICM

미육군공병단 수리시험소에서는 원래 Chesapeake 만에 적용되는 통합된 모형으로서 CE-QUAL-ICM을 개발하였다. 오염물의 이송은 사용자가 지정하거나 연계된 다차원의 동수역학 모형 결과를 이용할 수 있다. 이 모형은 침전 산소요구량과 영양물질의 유동을 예측하기 위해 보다 정교한 식물성 플랑크톤-영양물질 균형 해석과정과 침전물의 발생원에 대한 모형을 가지고 있다. 이 모형은 활발히 개발되고 있으며 독성물 모의를 실시하도록 확장되고 있다. CE-QUAL-ICM은 WES에서 구할 수 있다.

(9) HEC5Q

미 육군공병단 수문연구소 (HEC)에서는 유역연구를 위해서 하천-저수지 시스템의 연계 모의하기 위해 HEC-5Q를 개발하였다. 흐름부분은 다양한 수문학적 추적 모형의 선택으로 운영되는 1차원 부정적 모형이다. 저수지 부분은 1차원 수직 모형이다. 이 모형은 용존산소, 생화학적 산소요구량, 보존적 또는 비보존적인 오염물의 선택을 모의할 수 있고 식물성 플랑크톤을 선택사항으로 포함하고 있다. HEC5Q는 HEC에서 저렴한 비용으로 구할 수 있다.

(10) SALMON-Q

HR Wallingford는 하천이나 하구부를 포함하는 1차원 하도망 내의 부정류, 퇴적, 수질을 모의하는 SALMON-Q를 개발하였다. SALMON-Q는 사용자 편의시스템 내에 모듈들을 통합시켰다. 수질 매개변수는 용존산소, 생화학적 산소요구량, 영양물질, 식물성 플랑크톤을 포함한다. SALMON-Q는 Wallingford Software에서 비용을 지불하고 구할 수 있으나 비교적 고가이다.

(11) MIKE-11과 MIKE-21

덴마크 수리연구소 (DHI)에서는 강이나 강어귀를 포함하는 1차원 하도망 및 2차원 수계 시스템에서 부정류, 침전물 운반, 수질을 모의하기 위해 이 모형을

개발했다. MIKE-11과 MIKE-21은 수문학, 동수역학, 점착/비점착 토사이동과 수질해석을 위한 모듈을 제공하는 대화식 시스템을 통해 운영된다. 수질 매개변수는 용존산소, 영양물질, 식물성 플랑크톤, 동물성 플랑크톤, 하상 퇴적물과 금속류 등을 포함한다. MIKE-11과 MIKE-21은 덴마크 수리연구소에서 비용을 지불하고 구할 수 있으나 매우 고가이다.

4. 각 하천수질모형의 비교

(1) 수역의 종류 및 차원

표 1은 각 모형에 대한 중요한 특성을 요약하여 정리한 것이다. 표에서 가장 중요한 항목은 수역의 종류이다. QUAL2E, SMP3, HSPF, CE-QUAL-RIV1, SALMON-Q와 MIKE-11을 포함하는 일부 모형들은 하천을 주로 다룬다. 다른 모형들은 특정한 수역 형태에 대해서는 효율성이 다소 떨어질지라도, 훨씬 일반적이다. EXAMS, WASP5와 CE-QUAL-W2는 저수지 모형으로 개발되었으나, 하구 뿐만 아니라, 수심이 깊고 유속이 느린 하천에도 적용할 수 있게 되었다. HEC5Q는 하천과 저수지를 포함하는 하천유역 계산을 위해 이용된다.

대상수역에 대한 차원은 모형이 실제 수역을 공간적으로 어떻게 나타낼 수 있는지를 결정한다. 대부분 강과 하천은 1차원이다. 여기에 나타난 모든 모형은 수리상 하도에 적용될 수 있다. 2차원 모형은 종방향과 횡방향(x/y)이나 종방향과 수직방향(x/z)을 다루고 있다. CE-QUAL-W2는 실제 x/z모형이다. 여기에 나타난 세가지 박스 모형은 1, 2차원이나, 3차원모형에 적용될 수 있다. 그러나 사용자는 기본방정식이 그 수식 상에 있어 본래 다차원이 아니라는 점을 주지하여야 한다.

(2) 시간 의존성과 흐름의 동수역학

모형이 수역을 동적으로 어떻게 나타낼 수 있는지를 결정한다. QUAL2E와 SMP3과 같은 정상상태 모형은 시간에 따라 변하지 않는 농도를 예측한다. 이들 모형은 유속이 작은 조건하에서 하천에 대해

서 유용하다. 동적과 유사동적 해석 모두 시간에 따라 변하는 농도를 예측한다. 유사동적 해석은 유량과 부하량, 광합성에 대한 태양의 영향과 같은 일부 주요 지배함수를 시간에 따라 변화도록 한다. 일반적으로, 하나 이상의 지배함수는 일정하거나 점진적인 변화만이 허용될 수 있다. 동적 해석은 모든 중요한 지배함수가 시간에 따라 변화하도록 한다. 이는 유입량과 부하량의 일변화, 또는 조석 경계에서의 시간 변화량 등을 포함한다.

모든 수질 모형은 물의 거동에 대한 정보를 필요로 한다. 일부 모형들은 이 정보를 입력자료로써 제공한다. 이들 모형은 사실상 정적이거나 類似的(類似動的) 상태이다. QUAL2E, SMP TOX3과 EXAMS는 유량이나 유속에 대한 입력정보를 필요로 한다: HSPF, WASP5, CE-QUAL-ICM 및 MIKE-11은 입력유량

을 받아들이거나, 동수역학을 모의수행하기 위해서 연계될 수도 있다. HSPF와 CE-QUAL-W2와 같은 일부 수질모형은 내부적인 동수역학 계산을 제공한다. 그러나 대부분은 별도의 동수역학 프로그램에 의해서 생성된 외부 동수역학 파일과의 연계를 필요로 한다. 이는 몇몇 서로 다른 동수역학 프로그램이나 생성파일들을 연계하면서 추가적인 유연성도 제공한다. 때때로 외부 프로그램과의 연계는 내부 연계만큼 매끄럽지 않거나 평이하지 않다. 일부 연계된 수질/동수역학 모형은 하천에서의 웨어나 저수두의 댐, 또는 저수지로부터의 선택적인 취수와 같은 조절구조물을 모의수행하기 위한 과정도 포함한다. 이들은 조절수역이나 설계수역에 훨씬 쉽게 적용될 수 있다.

### (3) 이송확산과 오염부하

여기서 언급된 모든 모형은 이송을 모의수행하고, HSPF를 제외한 모든 모형은 확산도 포함한다. 대부분 하천은 오염물의 유입이 일정하여 확산이 심하지 않고 모형구조와 해석기법도 약간의 수치적 확산을 도입하기 때문에, 대부분 1차원 하천 모의수행에 있어서 확산의 영향이 고려될 필요가 없다. 정확한 확산계수는 일반적으로 호소, 저수지 및 하구부의 수질을 모의수행하는데 있어 필요하다. 대부분 모형은 수치적 확산을 최소화하기 위하여 사용자가 계산시간 간격을 임의로 설계하도록 요구한다: CE-QUAL-W2에서 수치적인 확산을 감소시키기 위한 특별한 노력은 최소매개변수의 조절로 개선된 수온의 검정이 이루어진다. 하상부에 대한 오염물 이송 거동은 SMP TOX3, HSPF, WASP5 및 EXAMS와 같은 유독성 화학 모형의 중요한 성분이 된다.

모든 모형은 사용자가 정적 오염물 부하량을 입력하도록 하고 있다. 일부

표 1. 지표수 수질모형에 대한 기본정보(Armbrose 등, 1996)

		QUAL2E	SMP TOX3	HSPF	WASPS	EXAMS	CEQUAL-1V1	CEQUAL-W2	CEQUAL-ICM	HEC5Q	SALMONQ	MIKE11
대상수체	하천	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	저수지/호소	×	×	×	○	○	×	○	○	○	×	×
	하구부	○	×	×	○	×	○	○	○	×	×	×
차원	1차원	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	2차원(x/y)	×	×	×	○	○	×	×	○	×	×	×
	2차원(x/z)	×	×	×	○	○	×	×	○	×	×	×
	3차원(Box형태)	×	×	×	○	○	×	×	○	×	×	×
시간	정상 상태	○	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×
	類以동적 상태	○	×	○	○	○	×	×	×	×	×	○
	동적 상태	×	×	○	○	×	○	○	○	○	○	○
동수역학	입력 여부	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○
	모의 여부	×	×	○	○	×	○	○	○	○	○	○
	수공구조물의 역할	×	×	○	×	×	○	○	○	○	○	○
이송확산	유체이동	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	확산	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	하상교환	×	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○
오염부하	입력(정상상태)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	입력(비정상상태)	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	모의여부	×	×	○	○	×	×	×	×	×	○	○
기타	전처리 과정	○	○	×	○	○	×	×	×	×	○	○
	후처리 과정	○	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○

모형들은 입력데이터 세트로부터 변동적인 오염물을 설정하도록 한다. 비점원 오염물질의 모의수행에 있어서 소수의 모형들이 내부적이거나 외부적인 연계를 제공한다. HSPF는 투수성과 불투수성 토양 모듈을 가지고 내부적인 연계를 이루는 특징이 있다. 또한, WASP5는 주어진 규격에 의해서 비점원 오염물질 파일을 통해서 많은 오염 모형으로 외부 연계를 제공한다.

MIKE-11과 SALMONQ는 도시폐수 모듈로의 연계를 포함하고, CE-QUAL-ICM은 Chesapeake 만의 적용을 위해서 HSPF와 연계되었다.

(4) 화학적 반응과정

모든 모형들은 사용자가 지정한 1차 감쇠율로 감소하는 상태 변수를 포함하고 있다. 유기화학의 모의를 전문으로 하는 일부 모형들은 반응 동역학을 포함할 것이다. 이 알고리즘은 pH, 빛, 수온과 같은 다양한

지배함수와 결합하여 화학적 특성으로부터 화학적 감소율을 예측한다. 화학적 처리 모형의 대부분은 변형 반응의 소산물을 추적할 수 있다.

감쇠과정 이외에도, 독성물질 모형은 부유 고형물과 하상 고형물에서의 흡착을 다루는 알고리즘도 포함해야 한다. 가장 간단한 기법이 평형 선형 흡착이다. 이 기법은 간단한 분할계수에 의해서 특성화된다. 고농도에서 흡착과정은 화학적 농도에 관하여 비선형이 된다. 여기에 나타난 모형 중에서 비선형 흡착 알고리즘을 포함하는 것은 없다. 흡착 동역학은 HSPF에서 선택적으로 이용되고, WASP5나 EXAMS에서는 분할계수와 함께 변형 반응을 이용하여 간접적으로 다루어질 수 있다. SMPTOX3, HSPF, WASP5 및 MIKE11을 포함하는 일부모형들은 비교적 간단한 방법으로 독성물질을 다룬다. HSPF, WASP5 및 EXAMS 등과 같은 모형들은 더욱 복잡한 방식으로 독성물질을 모의하는 기능을 가지고 있다.

표 2. 지표수 수질모형에서의 변수와 수질반응과정 (Armrose 등, 1996)

		QUAL2E	SMPTOX3	HSPF	WASPS	EXAMS	CEQUALRV1	CEQUALW2	CEQUALICM	HEC5Q	SALMONQ	MIKE11
화학적 반응	1차 減衰 반응 動力學	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	화학적 副產物	×	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×
	흡착	×	○	○	○	○	×	×	×	×	○	×
토사이동	변동물 입력과정	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○
	비점착성 이동과정	×	×	○	×	×	×	×	×	×	○	×
	점착성 이동과정	×	×	○	×	×	×	×	×	×	○	×
수질과정	수온	○	×	○	×	×	○	○	○	○	○	○
	염도	○	×	○	×	×	○	○	○	○	○	○
	박테리아	×	×	○	×	×	○	○	○	○	○	○
	DO-BOD	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	○
	DO-Carbon 균형	×	×	×	×	×	×	○	○	×	×	×
	질소 순환	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	○
	인 순환	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	○
	규소 순환	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○
	식물성 플랑크톤	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○	○
동물성 플랑크톤	×	×	○	×	×	×	×	○	×	○	×	
하상 조류	×	×	○	×	×	×	×	×	×	○	○	
하상 산소요구량	×	×	×	○	×	×	○	○	×	×	×	

(5) 유사이송 과정

유사이송 과정은 독성물질을 모의수행하는 모형들에 있어서 가장 중요하다. 상태변수로써 유사나 고형물을 모의 수행하는 모형의 대부분은 사용자가 지정하는 퇴적, 재부상, 침전율을 가지고 간단한 질량평형 접근법을 이용한다. HSPF와 MIKE-11과 같은 일부 모형들은 흐름과 유사 특성을 기초로 점착성 및 비점착성 유사의 퇴적과 재부상을 예측하기 위한 알고리즘을 포함하고 있다. 토사이송만을 전문으로 처리하는 많은 모형들이 있으나, 그것들은 수질 변수와 수질처리과정을 포함하지는 않는다. 그와 같은 토사이송모형은 여기서는 다루지 않았다.

(6) 대상오염물의 반응과정

일반적인 오염물질에 대한 수질모형

의 대부분은 수온을 단순한 열평형 이론을 의해서 모의수행하고 있다. WASP5와 EXAMS에서 수온은 사용자의 입력으로써 부여되며 모의수행은 하지 않는다. 염도는 대부분 모형에서 포함되는 또 다른 변수이다. 이것은 이송검정을 위한 추적물질이나, DO 포화도 검정 성분으로서, 이용된다. 염도가 WASP5와 EXAMS에 포함되지는 않을 지라도, 감소나 흡착이 일어나지 않는 화학적 상태 변수를 이용하여 모의 수행될 수 있다. 대장균과 같은 박테리아는 많은 모형에 포함된다. 그럼에도 불구하고, 박테리아를 모의 수행할 수 없는 모형들은 박테리아의 동역학을 모의수행하기 위하여 1차 감소와 비흡착성을 가진 화학적 상태변수를 이용할 수 있다. 박테리아에 대해서 서로 다른 분석단위로서 주어졌을 때, 사용자는 박테리아 부하량과 경계조건을 적절히 설정하기 위하여 주의해야 한다.

대부분의 일반적인 오염물질 모형은 질산화, 식물성 플랑크톤 성장과 호흡, 하상 산소요구량 뿐만 아니라 생화학적 산소요구량과도 연계된 용존산소를 다룬다. CE-QUAL-ICM은 생화학적 산소요구량보다 오히려 유기탄소를 이용하여 용존산소를 계산한다. 질소와 인 순환은 부영양화를 다루는 모형들에 의해서 취급될 수 있다. 예를 들면, 인 순환은 무기인, 식물성 플랑크톤 인과 유기인을 포함한다. 질소순환은 암모니아 질소, 아질산염 질소, 질산염 질소, 식물성 플랑크톤 질소, 유기질소를 포함한다. CE-QUAL-ICM과 같은 일부 모형들은 개개 미립자로 이루어져 있고, 용존되어 있으며, 불안정하고, 다루기 힘든 형태와 같은, 다양한 형태에서 유기 질소와 인을 모의 수행할 수 있는 더욱 복잡한 영양물질의 순환을 이용한다.

또한 일부 모형들은 규조류의 성장을 다루기 위해서 규소순환을 다루기도 한다. 대부분의 부영양화와 모형은 단일 변수로서 식물성 플랑크톤을 다룬다. CE-QUAL-ICM은 세 가지 종류의 식물성 플랑크톤을 각각 다룬다. 동물성 플랑크톤은 여기에서의 두 모형인 CE-QUAL-ICM과 MIKE-11의 변수로서 포함된다. 하상 조류는 최근에 실험적으로 일부 모형에 추가되었다. MIKE-11과 SALMONQ는 그들의 모형

에 하상 조류를 포함한다. 하상 영양물질 이동과 함께, 하상 산소요구량은 현재 사용자에 의해 거의 항상 설정된다. WASP5가 하상 영양물질과 하상 산소요구량을 모의수행하는 기본 기능을 가지고 있을지라도, 단지 CE-QUAL-ICM만이 완전하게 발전된 형태로 이 기능을 제공하고 있다.

### (7) 전·후처리 과정

대다수의 모형들은 사용자가 입력자료를 설정하는데 도움을 주기 위해 전처리과정을 포함하고, 모의수행의 해석에 있어서 도움을 주기 위해 그래프 등을 통한 후처리과정을 포함한다. 지원되는 소프트웨어의 범위와 방식은 완전히 통합된 패키지 형태로 상용프로그램에 연계할 수 있는 연결 모듈까지 다양하다.

## 5. 적용할 모형의 선정

간단한 Streeter-Phelps 식에 의한 해석적인 수질 모형은 1920년대부터 사용되어 왔다. 더 복잡하고 전산화된 수질 모형들은 최근 30여년 이상 사용되고 있다. 많은 모형들은 오랜 기간동안 발전해 왔으며 그 적용성에 대한 기술축적이 확립되었다. 우수한 모형의 한 예로는 QUAL2E가 있으며, 이 모형은 하천에서 일반적인 수질해석을 위한 범세계적인 모형이다.

다른 모형들은 최근 만들어졌고 새로운 과학적 알고리즘을 가지고 있다. 좋은 예로는 혼합영역 해석을 위한 CORMIX 전문가 시스템과 수주와 하상에서의 일반적인 수질 상호작용 해석을 위한 CE-QUAL-ICM이 있다. 독성오염물 모형은 지난 10년간에 걸쳐 사용되어 왔다.

EXAMS와 같은 일부 모형들은 유기화학 작용을 강조하며 간단한 수계 내의 독성오염물 해석을 위해 많이 사용되었다. HSPF와 WASP5와 같은 모형들은 보다 복잡한 수계 내의 흐름, 유사이송 및 화학적인 동역학을 모의하는 운반체제 내에서의 EXAMS에서 적용된 화학 동력학을 다루고 있다. HSPF는 지표면 유출과 하도구간에 대한 내부적인 연계를 통해서 수계를 다루도록 구성되어있다. WASP5는 외부적으로



동수역학과 유출모형의 외부적인 연계가 가능하다. SPMTOX3는 이용하기 쉽도록 하기 위해서 화학적 動力學과 이송 알고리즘을 단순화했지만 독성물질에 대한 예측 모의시스템은 단순화하지 못했다.

미국 육군공병단에 의해서 개발된 일련의 모형들은 정규화된 하천과 저수지에서의 동적 흐름과 이송을 다루고 있다. CE-QUAL-RIV1, CE-QUAL-W2와 HEC5Q는 일반적인 수질 상호작용에 대해서 설명하고 있다. 외부 다차원 동수역학 모형과 연계하도록 설계된 CE-QUAL-ICM은 가장 복잡한 수질 동역학을 다룬다. 몇몇 최근 경향은 지표수 수질 모의에서 명백히 나타난다. 한 가지 중요한 점은 그래픽 셸과 의사결정 시스템 내에서 모형들을 연계시킴으로써 실제적인 모의를 용이하게 한다는 것이다. 이 셸들은 데이터베이스와 모형을 연계할 뿐 아니라 표준화된 파일 변환을 통해서 다른 모형과도 연계할 수 있다. 특히, 이제는 3차원 동수역학 프로그램과 수질 모형을 더욱 연계할 수도 있다. 연계된 수역-수체 모의 시스템들 또한 만들어지고 있다. 일반적인 오염물질 모의에서 중요한 경향은 하상 경계를 하상 산소요구량과 하상 영양물질 이동의 직접적인 모의로 대체되고 있다는 것이다.

## 6. 결론

하천수역은 어류와 수중생물에게 서식지를 제공하고, 인간이 마실 물과 수산업, 놀이공간, 폐수의 방류

수역, 그리고 항해를 위한 주운을 제공해 주는 유용한 자원이다. 하천수 수질은 농업, 도시개발 등의 토지 이용과 도시하수 및 산업폐수의 방류수역, 항해를 위한 준설, 수자원 공급을 위한 저수나 홍수조절 등의 직접적인 물의 이용 등을 포함해 수많은 인류의 활동에 크게 영향을 받는다. 수질보호와 개선을 위해 인간 활동의 통제관리를 위해서 환경영향평가가 실시되고 있다. 현재 많은 예산이 폐수처리장 건설에 투입되고 있는 상황에서도 수질악화는 급격히 진행되고 있어, 적정수질을 갖춘 지표수의 확보가 커다란 사회문제로 대두되고 있다. 특히, 대규모 오염원과 상수취수장이 공존하는 하천, 저수지 등에서의 수질문제는 오염문제 발생시에만 임기응변식으로 대처할 것이 아니라 수질모델링을 이용하여 장·단기적인 대책을 수립하고, 각水系에 대해서 일관성있는 수질관리대책이 절실히 요구되고 있다.

이제 지표수의 수질문제는 관련 공무원이나 전문가들의 문제가 아니라 전 국민의 주요 관심사 중의 하나가 되었다. 앞으로의 수질모델링은 기존의 선진국에서 개발된 모형의 도입과 이들 모형의 국내유역에 대한 적용에만 국한될 것이 아니라, 우리나라의 지형, 기후, 수리·수문 및 수질특성에 적합한 모형의 개발이 절실한 것으로 사료된다. 또한 독자적인 수질해석 모형을 GIS 및 expert system과 연계운영 되도록 하여야 하며, 수질모형의 검증과 증명을 위한 정확하고 광범위한 수질실측자료의 축적이 절실히 요구되고 시점이다. ●

## 〈참고 문헌〉

- 백경원, 김상호, 한건연, 송재우. (1995). "QUAL2E에 의한 한강 하류부에서의 수질해석", 대한토목학회 논문집, 제15권, 제2호, pp. 451-461.
- 조홍제, 김상호, 한건연. (1996). "낙동강 하류부에서의 오니준설에 따른 수질영향 분석", 한국수자원학회 논문집, 제29권, 제3호, pp. 177-186.
- 한건연, 이정식, 김상현, 김홍태. (1994). "낙동강 중류부에서의 확정론적 수질해석", 한국수문학회 논문집, 제27권, 제1호, pp. 53-67.
- 한건연, 김광섭, 박재홍 (1994). "하천으로 유입된 오염물의 유동해석을 위한 동역학적 모형의 개발", 한국수문학회논문집, 제27권, 제4호, pp. 145-154.
- 한건연, 김광섭. (1995). "낙동강 유역에서의 독성오염물 배출에 따른 수질해석 모형의 개발", 한국수자원학회 논문집, 제28권, 제1호, pp. 57-69.
- 한건연, 김상현, 박재홍. (1995). "하천수질변동의 예측을 위한 추계학적 수질해석 모형의 개발", 한국수자원학회 논문집, 제28권, 제2호, pp. 103-113.

- 
- 한건연, 송재우, 김상호, 백경원. (1995).  
“한강하류부에서의 총질소와 총인에 대한 수질모의”,  
한국수자원학회논문집, 제28권, 제4호, pp. 137-146.
- 한건연, 김상호. (1997). “낙동강에서의 신뢰도 해석에  
의한 수질예보시스템의 개발”, 한국수자원학회논문집,  
제30권, 제4호, pp. 411-420.
- Armrose, R.B., Barnwell, T.O., McCutcheon, S.C.,  
and Williams, R.T. (1996). “Computer models for  
water quality analysis.” in Water Resources  
Handbook (ed. by Mays, L.W.), McGraw-Hill,  
New York.
- Bartsch, A.F., and Ingram, W.F. (1967). Biology of  
Water Pollution, U.S. Dept. of Interior, Water  
Pollution Control Federation.
- Chapra, S.C. (1997). Surface Water-Quality  
Modeling, McGraw-Hill, New York.
- James, A. (1993). An Introduction to Water Quality  
Modeling, John Wiley and Sons, New York.
- McCutcheon, S.C., and French, R.H. (1989). Water  
Quality Modeling, Vol. 1, CRC Press, Boca Raton.
- Schnoor, J.L. (1996). Environmental Modeling -  
Fate and Transport of Pollutants in Water, Air,  
and Soil, John Wiley and Sons, New York.
- Stefan, H.G., Armrose, R.B., and Dortch, M.S.  
(1989). Formulation of Water Quality Models for  
Streams, Lakes, and Reservoirs, US Army Corps  
of Engineers, Waterways Experiment Station,  
Vicksburg.
- Thomann, R.V. and Mueller, J.A. (1987). Principles  
of Surface Water Quality Modeling and Control,  
Harper and Row, New York.