

## 수질오염총량관리를 위한 하천수질모델(QUAL-NIER) 개발

박준대<sup>†</sup> · 신동석<sup>\*</sup> · 김문숙 · 공동수<sup>\*\*</sup> · 류덕희 · 정동일 · 나은혜

국립환경과학원 환경총량관리연구부

<sup>\*</sup>국립환경과학원 금강물환경연구소

<sup>\*\*</sup>국립환경과학원 한강물환경연구소

### Development of a Stream Water Quality Model (QUAL-NIER) for the Management of Total Maximum Daily Loads

Jun Dae Park<sup>†</sup> · Dong Seok Shin<sup>\*</sup> · Moon Sook Kim · Dong Soo Kong<sup>\*\*</sup> ·  
Doug Hee Rhew · Dong-Il Jung · Eun Hye Na

*Environmental Cap System Research Department, National Institute of Environmental Research*

*<sup>\*</sup>Geum River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research*

*<sup>\*\*</sup>Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research*

*(Received 18 September 2008, Revised 28 October 2008, Accepted 30 October 2008)*

#### Abstract

Greater focus must be placed on ensuring that the water quality model (WQM) reflects the objective of its application and the characteristics of the water environment properly before it is selected. In the development or application of WQM, various factors influencing the model predictions should be reviewed so that it can perform more properly and reasonably based on scientific theory. This study reviewed the characteristic of existing WQM and the domestic river environment to find the requirements of the model application for TMDLs management in Korea. In this study, a water quality model, QUAL-NIER, was developed based on the USEPA's QUAL2E. The core structure and reaction scheme of the model was established followed by the formulation of equations according to the scheme with some supplements on the reaction mechanisms which are necessary for domestic rivers. Algorithms on the equations were set up and programmed to form a computer-based model. The developed model, QUAL-NIER was applied to the main stem of the Nakdong river. The model was calibrated and verified to data measured in 2004. The model results displayed good agreement with the field measurements for both calibration and verification. From this study, it was concluded that the developed QUAL-NIER model was very powerful with regard to the water quality simulation in domestic rivers.

**keywords** : Nakdong river, QUAL-NIER, TMDLs, Water quality model

## 1. 서론

수질모델은 수체 내에서 일어나는 오염물질의 변화 현상 및 상호관계를 정량적으로 표현하는 것으로 지금까지 수질 관리정책을 지원하기 위한 중요한 도구로 이용되고 있다. 대상 수체에 적합한 수질모델의 적용을 통하여 오염물질 유입 및 수체 내 수질반응을 고려한 수질 현황 평가가 가능하며, 장래 개발행위에 의한 수질변화 예측과 다양한 수질관리대안에 따른 개선 효과를 평가함으로써 합리적인 수질관리 대책을 수립할 수 있다.

최근 우리나라에서 오염총량관리제가 시행됨에 따라 대상유역에서 배출되는 오염부하량 산정과 함께 오염물질 유입에 따른 하천의 수질변화를 예측할 수 있는 수질모델의 적용이 매우 중요한 문제가 되었다. 즉 수계구간의 목표수

질설정, 수역의 환경용량산정, 수역의 허용부하량을 기준으로 한 부하량의 할당 및 삭감계획수립, 수질개선대책의 이행에 따른 목표수질 달성여부평가 등 오염총량관리계획의 중요한 시행 과정에서 수질모델이 활용되고 있으므로 과학적 근거 하에 보다 합리적인 방법으로 정확한 수질모델링 결과를 제시할 수 있어야 한다.

정확한 수질 예측을 위해서는 모의하고자 하는 수질인자의 변화 현상과 대상 수체의 특성에 적합한 수질모델을 적용하여야 하며, 기존에 개발되어 타당성이 검증된 모델 중 적합한 모델이 없는 경우에는 새로운 모델을 개발하여야 한다. 본 연구에서는 오염총량관리제 시행과 관련하여 현재까지 국내외에서 개발·사용되고 있는 수질모델의 특성과 국내 하천에 대한 적용 요건을 분석하였으며, 국내 하천에서 적합하게 적용할 수 있는 하천수질모델을 개발하는데 목적이 있다. 또한 개발된 모델의 타당성 검토를 위하여 낙동강 수계에 모델을 적용하였으며, 국내 하천특성에 따라

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
parkjd@me.go.kr

측정된 수질모델인자 값을 기반으로 모델의 보정 및 검증  
을 수행하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 국내외 수질모델의 특성 및 국내 하천에 대한 적용성 검토

본 연구에서는 현재까지 외국에서 개발된 수질모델 중 미연방환경보호청에서 개발한 QUAL2E 등 14개 모델, 미육군공병단에서 개발한 CE-QUAL-W2 등 11개 모델, 미국 지질조사단에서 개발한 BLTM 등 7개 모델, 캐나다 자원관리협회에서 개발한 RMA 등 7개 모델, 덴마크 수리연구소에서 개발한 MIKE3 등 3개 모델들을 대상으로 모델의 적용목적, 주요 모의항목 등을 검토하였으며, 이들 모델 중 국내외에서 비교적 널리 사용되고 있는 10개 모델(QUAL2E, QUAL2K, CE-QUAL-R1, CE-QUAL-RIV1, CE-QUAL-W2, CE-QUAL-ICM, WASP5, WQRRS, MIKE11, HSPF)을 대상으로 유기물질 관련 수질변수에 대한 반응식을 중점적으로 분석하였다(Ambrose et al., 1993; Bicknell et al., 1997; Brown and Barnwell, 1987; Cerco and Cole, 1995; Chapra and Pelletier, 2003; Cole and Well, 2003; Environmental Laboratory, 1986, 1990; Havnø et al., 1995; U. S. Army Corps of Engineers, 1978). 분석 결과 10개 모델 중 8개의 모델에서 BOD가 모의 가능하며, 모두 CBOD 형태로 모의하고 있다. 이들 모델 중 CE-QUAL-W2, WQRRS, QAUL2E, MIKE11 및 HSPF 모델에서는 다른 수질항목에 의한 영향을 고려하지 않고 CBOD 자체의 생물학적 또는 물리적 과정만을 고려하고 있으며, QUAL2K, WASP5 및 CE-QUAL-RIV1에서는 다른 수질항목과의 상호반응과정도 함께 고려하고 있다. 유기물질 관련 항목을 모의하고 있는 모델 중 CE-QUAL-W2 모델에서 유기물질은 용존성 유기물질(Dissolved Organic Matter, DOM)과 입자상유기물질(Particulate Organic Matter, POM)로 구분되며, 각각은 다시 분해성(Labile)과 난분해성(Refractory) 형태로 구분하여 모의된다. CE-QUAL-R1에서는 용존성 유기물질에 대해서만 분해성과 난분해성 형태로 구분하여 모의하며, QAUL2K는 입자상 유기물질에 대해서만 구분하여 모의할 수 있다. CE-QUAL-ICM의 경우 유기물질 중 유기탄소만을 용존성과 입자상 형태로 구분하여 모의하며, 입자상 유기탄소는 다시 분해성과 난분해성으로 구분하여 모의하고 있다.

국내에서의 수질모델 관련 연구를 살펴보면 1990년대에 들어 국내 수체의 특성에 적합한 모델 개발을 위한 노력이 보다 활발해졌다. 박석순 등(1991)은 유속이 빠른 국내 산지형 하천에 적합하도록 모델의 계산과정을 단순화시키기 위하여 CIS(Cell-in-Series) 방법에 기초한 STREAM을 개발하였으며, 이에 수량과 수질에서 무작위 현상이 크게 나타나고 있는 우리나라 하천에 적합하도록 몬테카를로 기법을 적용하여 확률모델 STRESS를 개발하였다(박석순과 이용석, 1993). 이 후 QUAL2E 모델을 기반으로 조류 사멸에 따른 BOD 증가와 탈질화 현상 그리고 부착식물에 의한 산

소변화와 같은 수질 반응기작을 추가하고, 대형수계에도 적용 가능하도록 수정한 KQUAL97모델이 개발되었다(박석순과 이용석, 1999). 또한 우리나라 소하천에서의 불연속적인 흐름과 제한적 자료여건을 고려하여 하천을 서로 다른 반응조가 연결된 시스템으로 보고 실제 하천조건에 맞도록 흐름 및 반응조건을 부여할 수 있는 CAP(CMP And PF) 모델이 개발된 바 있다(서동일과 이은형, 2003). 오염총량관리를 목적으로 개발된 수질모델로는 유역을 일정한 수리학적 특성 및 반응속도상수를 갖는 소유역으로 분할하고 소유역 내 점 및 비점오염원을 고려할 수 있도록 개발된 AMB(Analytical Model of BOD)가 있다(김경섭과 안태진, 2000). 또한 국립환경연구원(2001)은 현재 오염총량관리 대상물질인 BOD에 대해 보다 정확한 수질예측을 위해 조류 사멸에 따른 BOD 증가 현상을 고려하고 실제 실험실에서 측정되는 Bottle BOD 반응기작을 모델에 도입한 QUALKO 모델을 개발하였다.

위 분석결과를 바탕으로 국내 수체의 특성과 오염총량관리를 위하여 국내 수체에 하천수질모델을 적용하는 경우 고려되어야 하는 현상들과 기존 개발된 모델 적용시 한계점을 하천현상학적인 측면, 수질시험방법적인 측면, 오염총량관리적인 측면에서 검토하였으며, 그 결과를 Table 1에 요약하여 제시하였다. 즉 본 연구에서는 Table 1에 제시된 오염총량관리를 위한 하천수질모델의 적용요건을 고려하여 이에 적합하도록 모델을 개발하였다.

### 2.2. 모델 개발 과정

본 연구의 모델 개발 목적은 물질의 반응 부분에 대한 개선이므로 모델의 기본골격이나 형태는 기존 모델을 인용하였다. 본 모델의 개발과정에서 인용한 표본모델은 1985년 미연방환경보호청에서 개발되어 현재까지 국내외에서 범용적으로 이용되고 있는 QUAL2E이며, 이 모델은 오염총량관리 계획과 같이 특정 기준유량(design flow) 조건에서 수질관리대책을 수립하는데 용이하게 이용될 수 있다. 한편 QUAL2E 모델을 기반으로 국내 수체에 적합한 수질 반응식을 수정 또는 추가하기 위해 QUALKO, WASP, CE-QUAL-W2, QUAL2K 모델 등 기존 개발 모델의 수질반응식을 일부 참고하였다.

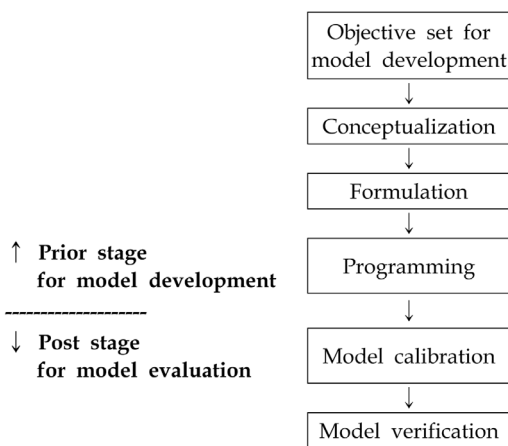
본 연구에서 개발된 하천수질모델은 표본모델인 QUAL2E 모델과 개발기관인 국립환경과학원(National Institute of Environmental Research, NIER)의 명문약자를 합하여 QUAL-NIER 모델로 명명하였으며, QUAL-NIER 모델의 개발과정은 사전모델구성단계와 사후모델평가단계로 나누어 진행하였다(Fig. 1).

#### 2.2.1. 사전모델 구성단계

사전모델 구성단계에서는 우리나라 4대강 수계를 대상으로 오염총량관리제를 실시함에 있어 수계구간별 목표수질의 설정, 오염총량관리의 계획수립 및 이행평가 등을 위한 도구로 이용하고자 하는 모델의 개발목적을 결정하였다. 특히 오염총량관리 대상물질인 BOD와 TP에 대해 보다 정확

**Table 1.** Requirements of water quality model for TMDLs management in domestic rivers

Consideration		Characteristics and limitation	Requisites for model application
River configuration	Slope of the river bed	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Oxygen deficiency rarely occur because the velocity of a river is comparatively fast due to steep gradient.</li> <li>○ The focus of model structure is mostly DO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ The focus of model structure must be converted to main water quality indicators in domestic rivers.</li> </ul>
	Flow rate	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Flow rates are highly seasonal variable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ The model must be able to estimate seasonal or monthly water qualities.</li> <li>○ The model can be calibrated and verified under specific flow conditions.</li> </ul>
	Flow stagnation	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Flow stagnations occur partially in downstream and it cause the algal blooms.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ The model must be able to estimate the additions of organic matters due to algal death.</li> </ul>
	Serial impoundment	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ There are many artificial dams in domestic rivers. (river-reservoir-river system)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ The model must reflect the water quality constituents that are applicable to reservoirs as well as rivers.</li> </ul>
Experimental methods for water quality concentrations	BOD	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Model equation of BOD does not reflect the reaction mechanism in BOD bottle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ The model needs the equation converting CBOD into bottle BOD(BOD<sub>5</sub>)</li> </ul>
	TN, TP	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Model equations of organic nitrogen and organic phosphorus reflect only non-living organic matters.</li> <li>○ TN and TP concentrations measured in laboratory contain organic matters in algae.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Model equations of organic nitrogen and organic phosphorus reflect not only non-living organic matters but also living organic matters (algae).</li> </ul>
TMDLs management	Division of organic matters	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ The reaction coefficients such as decay rate and settling velocity are applied uniformly to all forms of organic matters.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ In the model, the forms of organic matters must be divided by the property and the existing form.</li> </ul>
	Water quality indicator	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Water quality indicator : BOD</li> <li>○ Applicable water quality indicators : Nitrogen, COD or TOC, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ The model can estimate the applicable water quality indicators such as TOC that is a immediate indicator of organic carbon.</li> </ul>
	Calculation process of BOD	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ In calculation process of BOD<sub>5</sub>, the conversion of BOD<sub>5</sub> into CBOD is omitted.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ In calculation process of BOD<sub>5</sub>, BOD<sub>5</sub> must be converted into CBOD in consideration of other water quality constituents.</li> </ul>



**Fig. 1.** Development and application procedures of water quality model.

한 예측이 가능하며, 정확한 유기물량의 측정지표로 향후 오염총량관리 대상물질로써 선정의 필요성이 대두되고 있는 TOC(Total Organic Carcon, 총유기탄소)에 대한 예측이 가능한 모델을 개발하는 것을 주요 목적으로 하였다. 모델의 개념화 과정에서는 대상수계를 하나의 시스템으로 간주하고 시스템의 공간적, 시간적, 생태적 범위나 유형은 표본인용모델인 QUAL2E와 동일하게 설정하였다. 공식화 과정

에서는 시스템 변수들을 수학적으로 나타내기 위하여 방정식을 작성하였다. 프로그래밍 과정에서 수질농도계산을 위한 알고리즘은 표본인용모델과 동일하며, QUAL-NIER 모델에 새롭게 추가된 Bottle BOD 및 유기탄소 등의 계산과정, 사멸조류의 유기물질 전환과정, BOD 입출력자료 전환 과정 등에 대해 알고리즘이 추가로 작성되었다.

**2.2.2. 사후모델 평가단계**

사후모델평가단계에서는 낙동강 본류의 중하류수역(고령지점에서 구포지점까지 총 134 km 구간) 본류 구간을 대상으로 모델의 보정을 수행하였으며, 모델적용구간은 총 23개 Reach, 134개 Element로 구성되었다(Fig. 2). 모의 구간으로 유입되는 지천들은 모두 점오염원 형태로 고려되었으며, 총 점오염원의 수는 60개이다. 모델 보정 및 검증을 위한 수질자료와 수질반응계수 범위 등은 「낙동강수계 수중생태계 수질모델인자 조사(II)(국립환경연구원, 2004a)」에서 실측된 자료를 이용하였다. 모델보정자료는 2004년 4월 실측수질 자료를 이용하였으며, 실측자료가 없는 지점은 다른 지점의 유량과 면적을 비교하여 면적비유량으로 입력하였다. 보정수질항목은 BOD, TN, TP, Chl.a 및 TOC이다. 보정시 수질반응계수는 국립환경연구원(2004a)에 제시된 각 수질반응계수의 범위 내에서 시행착오법을 이용하여 선택적용하였다.

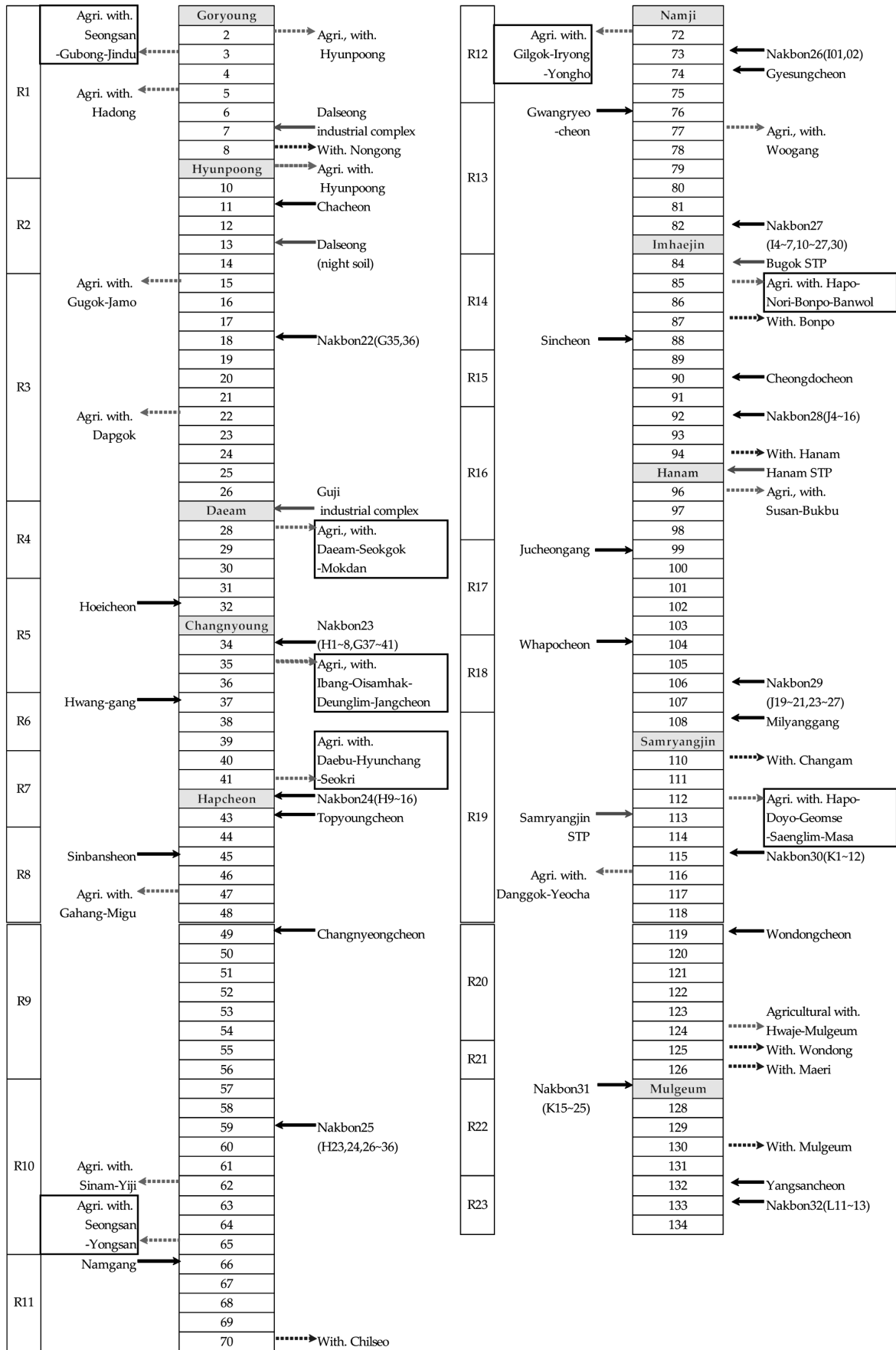


Fig. 2. System segmentations and location of pollution sources in the Nakdong River model.

모델 검증시에는 보정에 사용된 매개변수들을 그대로 사용하고 2004년 9월에 실측한 수질자료를 이용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 모델 구조 및 원리

본 연구에서 개발한 모델은 표본인용모델인 QUAL2E 모델의 DO 중심구조로부터 우리나라 하천 및 호소에서 주요 수질지표로 사용되고 있는 유기물, 영양염류, 조류 중심구조로 변환되었다(Fig. 3). 즉 그림에서 보는 바와 같이 유기물질은 크게 입자성과 용존성으로 구분하고, 조류의 물질대사에 따른 유기물의 증가 및 질소·인의 순환과정을 모델 중심구조로 설정하였다.

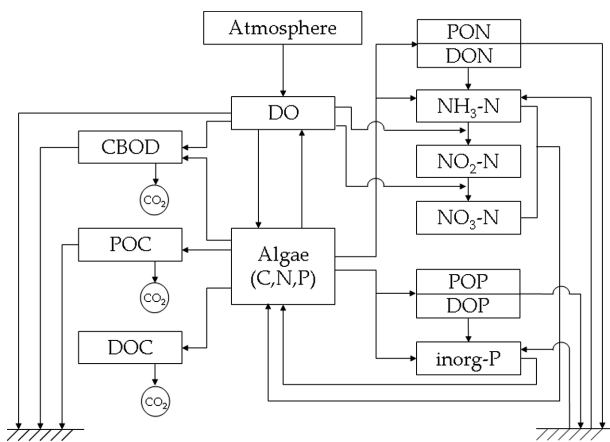


Fig. 3. Reaction scheme and interactions of major constituents in water column.

또한 이미 개발된 모델에서 고려된 수질반응구조 및 수질변수 간의 상호작용 등을 검토하여 국내하천에 적용하기 위해 요구되는 반응기작을 보완하였으며, 유기물, 영양염류(질소 및 인) 및 조류에 대한 수질반응식을 작성하였다.

유기물과 관련된 수질항목은 CBODu와 Bottle BOD<sub>5</sub>로 구분되며, 이에 대한 수질반응식은 Table 2에 제시하였다. 수체 내에서 조류가 분비/사멸하게 되면 조류의 유기물이 수중으로 순환되어 수체 내의 유기물 증가를 가져오게 되는데 기존 QUAL2E 모델에서는 이러한 증가 현상이 반영되지 않았으며, 따라서 QUAL-NIER 모델에서는 CBODu 계산시 이를 고려하였다. 또한 CBODu를 BOD<sub>5</sub>로 전환하는데 있어 실제 실험실에서 Bottle BOD 측정시 나타나는 산소소모반응을 고려 가능하도록 반응식을 작성하였다. 한편 QUAL-NIER모델에서는 향후 오염총량관리 대상물질로 대두되고 있는 TOC에 대한 모의가 가능하도록 관련 수질인자를 포함하였다. 즉 총유기탄소를 생물성 유기탄소(Algal organic carbon)와 비생물성 유기탄소(Non-Algal organic carbon)로 구분하고, 비생물성 유기탄소는 입자성과 용존성으로 구분하였으며 이들은 각각 분해성과 난분해성으로 분리하여 계산되도록 하였다. 한편, 조류사멸에 따른 유기물 및 유기탄소 증가량은 사멸량과 분비량으로 구분하여 계산되도록 고려하였다.

영양염류(질소 및 인) 계산시에도 생물성 유기영양염류를 포함하였으며, 비생물성 유기영양염류는 입자성과 용존성으로 구분하고, 이는 다시 분해성과 난분해성으로 분리하여 계산할 수 있도록 하였다. 조류에 의한 질소, 인의 증가 반응에서는 유기탄소의 경우와 마찬가지로 조류의 사멸/분비/호흡으로 분리시켜 각각 존재형태별로 질소, 인과 반응하도록

Table 2. Equations for the BOD and organic carbon in QUAL-NIER model

<BOD>	
① CBODu	$\frac{dL}{dt} = \alpha_7 \rho_2 \mu A + \alpha_7 \rho_3 A - K_{1L} - K_{3L}$ excretion death decay settling
② BOD <sub>5</sub>	$\text{Bottle BOD} = \text{CBOD}_5 + \text{NOD}_5 + \text{AOD}_5$ $= \text{CBODu} (1 - e^{-5K_{dbot}}) + 4.57 \text{NH}_3\text{-N} (1 - e^{-5K_{nbot}}) + \alpha_4 A (1 - e^{-5K_{1R}})$ decay nitrification respiration
<Organic Carbon>	
① LPOC	$\frac{dC_1}{dt} = \alpha_8 \rho_3 P_a A - \beta_5 C_1 - \sigma_7 C_1$ death decay settling
② RPOC	$\frac{dC_2}{dt} = \gamma_1 C_1 - \beta_7 C_2 - \sigma_7 C_2$ transfer decay settling
③ LDOC	$\frac{dC_3}{dt} = \alpha_8 \rho_2 \mu A + \alpha_7 (1 - P_a) \rho_3 A - \beta_7 C_3$ excretion death decay
④ RDOC	$\frac{dC_4}{dt} = -\beta_8 C_4$ decay
⑤ Algal organic carbon	$C_5 = \alpha_8 A$ biomass

를 고려하였다.

DO의 경우 QUAL2E에서는 조류호흡에 의한 산소 소모시에 호흡/사멸이 구분되어 있지 않으나 QUAL-NIER 모델에서는 기 개발된 QUALKO 모델에서와 같이 호흡/사멸을 구분하여 호흡만을 고려하도록 하였다. 또한 Table 1에서 검토한 바와 같이 국내하천수계의 환경 특성상 낮은 농도의 DO는 거의 나타나지 않고 또한 모델의 공간성이 1차원 혼합반응조임을 고려할 때 논리적 모순을 배제하기 위하여 탈질화 과정은 고려하지 않았다. QUAL-NIER 모델의 질소, 인, DO 등에 대한 수질반응식은 국립환경연구원(2004b)에 제시하였다.

3.2. 모델의 알고리즘 및 프로그램

수질변수 수치해석 알고리즘은 물질이송방정식인 편미분방정식을 유한차분방정식으로 전환하여 각 방정식들의 계수에 대한 행렬식을 구성한 다음 이 행렬식으로부터 각 계수 값을 구하고 가우스 소거법을 사용하여 수질농도를 계산하도록 하였다. 프로그램의 구성은 1개의 주프로그램(main program)과 51개의 부프로그램(subroutines) 및 11개의 추가 삽입파일로 구성되어 있는 QUAL2E 표본 인용모델의 프로그램 구조를 그대로 유지하면서 수질변수 계산을 위하여

추가적으로 필요한 프로그램은 독립적인 부프로그램으로 작성하고, 또한 관련 부프로그램을 수정하거나 보완하여 1개의 주프로그램과 65개의 부프로그램 및 11개의 삽입파일로 구성하였다(Fig. 4).

BOD 입력자료 전환 알고리즘에서는 입력값이 Bottle BOD<sub>5</sub> 또는 CBOD<sub>5</sub> 값으로 입력되면 모두 CBOD<sub>u</sub> 값으로 환산된 후 CBOD<sub>u</sub> 농도 변화 및 DO 계산이 이루어지도록 하였으며, 출력시에는 입력형태와 동일한 형태로 다시 환산 되도록 하였다.

또한 QUAL-NIER 모델에서 유기탄소, 질소 및 인과 관련된 유기물질을 예측하는 경우 일반적으로 측정되는 수질농도로부터 이들 유기물질을 성상별 및 존재형태별로 구분 가능하도록 알고리즘을 작성하였으며, 본 모델에서는 물질구분을 위하여 분리계수(partition coefficient) 개념을 도입하여 적용하였다(Fig. 5).

3.3. 모델의 보정 및 검증

대상수계에서 측정된 수질자료와 국립환경연구원(2004a)에서 조사한 낙동강 본류 수계에서의 수질반응계수 실측자료를 이용하여 모델반응계수를 보정하였으며, 그 결과를 실측된 반응계수 범위와 함께 Table 3에 제시하였다. Table 3

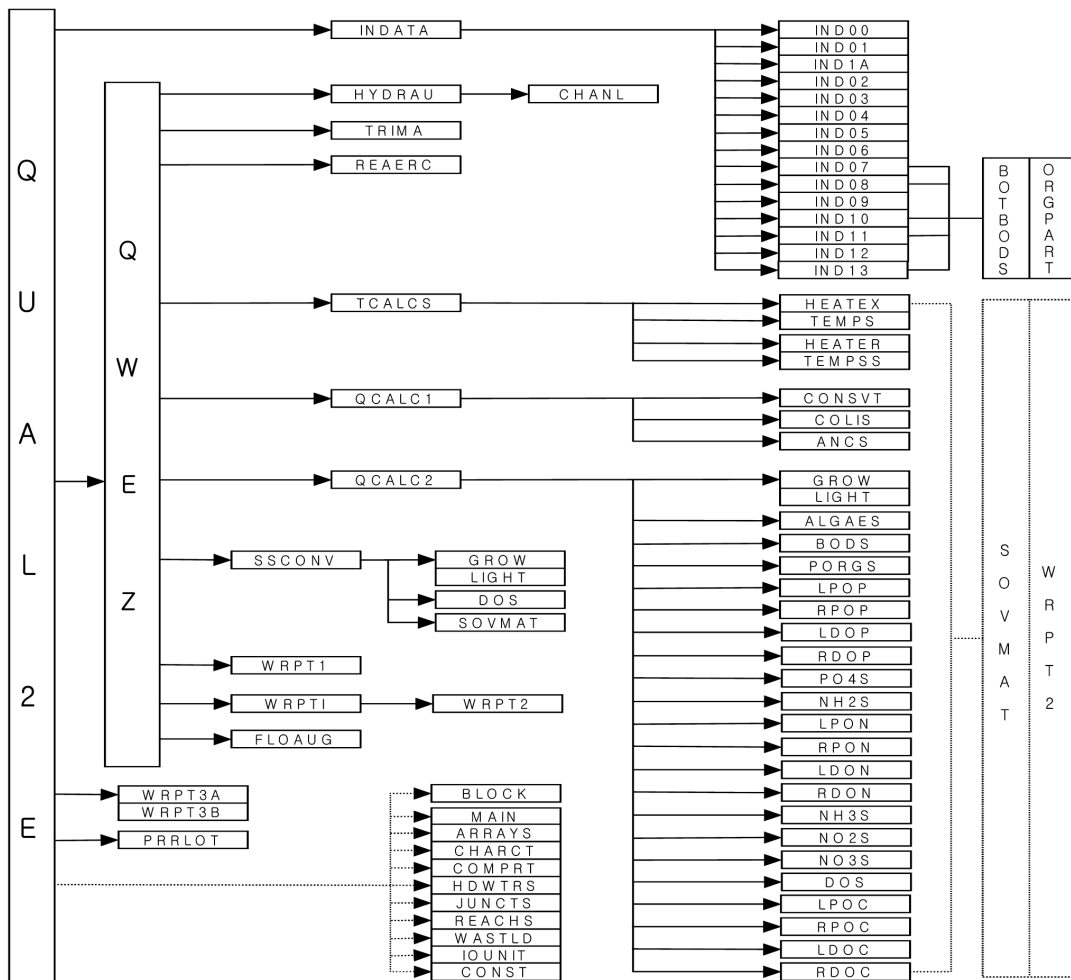


Fig. 4. Program structure of water quality model.

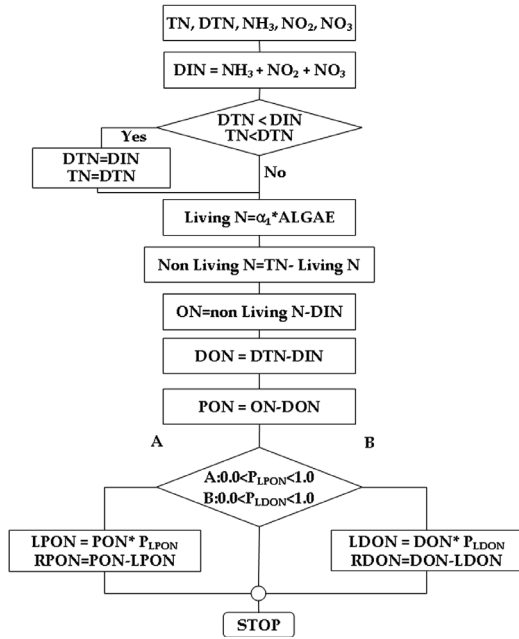


Fig. 5. Separation process of organics by existence state - Nitrogen.

에서 보는 바와 같이 낙동강에 적용된 QUAL-NIER 모델에서 사용된 반응계수값은 실제 낙동강 분류 수계에서 측정된 범위에 적절히 포함되도록 보정하였다. 낙동강 분류 134 km 구간에 대한 모델 보정 및 검증 결과를 측정값과 비교하여 Fig. 6에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 TOC를 제외한 대부분 수질 항목의 경우 하류로 갈수록 농도가 증가하는 경향을 보였으며, 대부분의 수질 항목에서 모델 예측 결과는 실측값과 적절한 일치를 보였다. 모델 예측의 신뢰도를 평가하기 위하여 각 수질 항목별로 RMSE (Root Mean Square Error, 평균제곱오차의 평방근)을 산정한 결과, BOD 0.89 mg/L, TN 1.02 mg/L, TP 0.09 mg/L, TOC 1.71 mg/L, Chl-a 7.20 µg/L로 평가되었다.

보정된 낙동강 QUAL-NIER 모델의 예측력을 확인하기 위하여 모델 보정시 사용된 수질반응계수와 동일한 값을 사용하면서 모델 검증을 수행하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 모델 검증시에도 모델 예측값과 실측값은 적절한 일치를 보였으며, 각 수질 항목별 RMSE는 BOD 0.53 mg/L, TN 0.82 mg/L, TP 0.03 mg/L, TOC 1.77 mg/L, Chl-a 13.72 µg/L로 평가되었다. 모델 보정 및 검증 결과 본 연구에서 개발된 QUAL-NIER 모델은 낙동강 분류의 상하류간 수질 변화를 비교적 안정적으로 예측하고 있는 것으로 판단되었으며, 따라서 본 모델은 수질오염총량관리를 위한 모델 적용에 있어 국내 하천수계의 특성을 적절하게 반영하고 합리적인 방법으로 수질해석이 가능한 것으로 판단된다.

### 4. 결론

본 연구에서는 기존 하천수질모델의 특성과 국내 하천에서 오염총량관리 시행시 모델의 적용 요건을 검토하였으며, 주요 검토 결과는 다음과 같다.

- 1) 국내수계에 하천모델을 적용하기 위해서는 CBOD 계산시 조류의 분비 및 사멸에 따른 증가 반응이 고려되어야 하며, CBOD가 실제 오염총량관리 대상물질인 BOD<sub>5</sub>로 전환될 때는 실험실에서 측정되는 Bottle BOD에서 실제 발생하는 수질반응들이 반영되어야 한다. 또한 정확한 유기물질 지표인 TOC에 대한 모의가 가능해야 한다.
- 2) 조류의 물질대사에 따른 유기물 및 질소·인과의 순환과정을 보완하여야 한다. 즉 유기물질 계산시 생물성 유기물질을 포함하고, 조류에 의한 유기물질 증가시 사멸/분비/호흡에 따른 영향을 분리하여 반영하여야 한다.
- 3) 분해계수, 침강계수 등의 합리적 적용이 가능하도록 유기물질을 성장별 및 존재형태별로 구분하여야 한다.

본 연구에서는 이러한 검토 결과를 바탕으로 국내 하천 및 오염총량관리제 시행시 적용에 적합한 하천수질모델,

Table 3. Summary of coefficient values used in QUAL-NIER model for the Nakdong river

		Unit	Ranges measured in the Nakdong river	QUAL-NIER
Carbonaceous deoxygenation rate constant		day <sup>-1</sup>	0.049~0.118	0.10
Decay rate	DOC	day <sup>-1</sup>	0.038~0.118	0.10
	POC	day <sup>-1</sup>	0.026~0.059	0.04
	ON	day <sup>-1</sup>	0.054~0.170	0.10
	OP	day <sup>-1</sup>	0.552~12.624	5.00
Settling velocity	PON	m/day	0.3~8.9	5.5
	POP	m/day	0.7~34.2	25.0
	POC	m/day	7.9~102.0	10.0
Phytoplankton	Ratio of chlorophyll a to algal biomass	µg-Chla/mg-A	0.2~14.0	10.0
	C content ratio	mg-C/mg-A	0.20~0.94	0.72
	N content ratio	mg-N/mg-A	0.07~0.64	0.085
	P content ratio	µg-P/mg-A	0.6~25.4	13
	Excretion rate for DOC	1/day	0.003~0.139	0.050
	Death rate	1/day	0.052~0.127	0.085
	Settling velocity	m/day	0.02~0.47	0.25

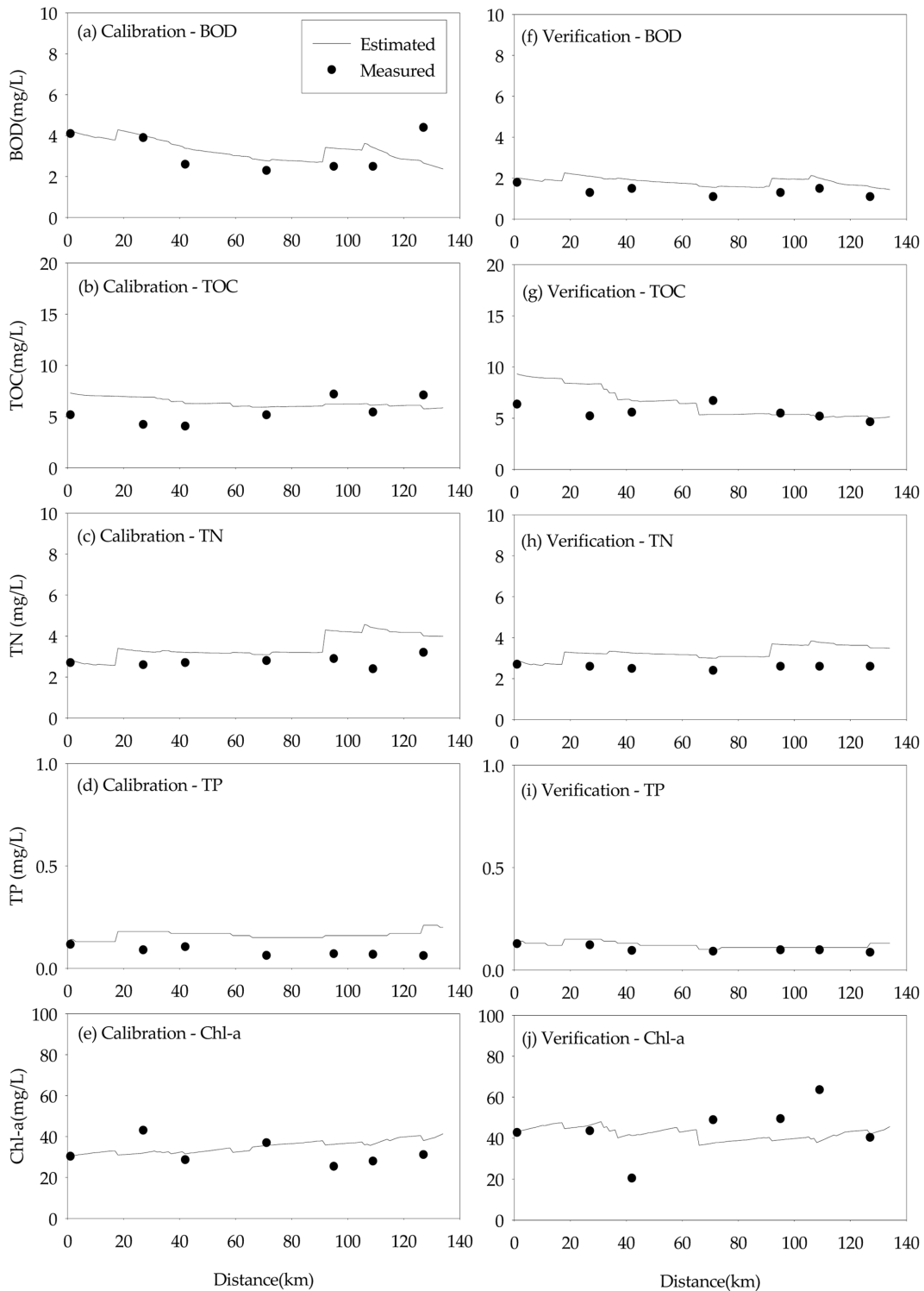


Fig. 6. Calibration and verification results of QUAL-NIER model for the Nakdong river.

QUAL-NIER 모델을 개발하였다. 즉, 1단계 오염총량관리 대상물질인 BOD에 대한 정확한 예측을 위하여 실험실 측정시 Bottle BOD에서 일어나는 수질 반응을 고려하였으며, 2단계 대상물질로 추가된 TP에 대한 보다 정확한 예측을 위해 생물성 유기물질을 포함시켰다. 또한 정확한 유기물질 측정지표로서 향후 대상물질로 선정될 가능성이 높은 TOC가 모의 가능하도록 모델을 개발하였다. 우선 모델의 중심

구조 및 수질반응구조를 설정하고, 국내 하천에 적용하기 위해서 요구되는 반응기작을 보완하여 관련 수질변수들에 대한 수질반응식을 작성하였다. 작성된 수질방정식들의 해를 구하기 위한 알고리즘을 작성하고 이를 컴퓨터 프로그램화 하였으며, 낙동강 수계 중하류 수역에 적용하여 개발된 모델의 타당성을 검토하였다. 대상수계에서 측정된 수질 및 유량자료와 주요 수질반응계수를 이용하여 모델을 보정



및 검증하였으며, 모델 보정 및 검증 과정에서 대부분의 수질항목에 대한 모델 예측값은 실측값과 적절한 일치율을 보였다. 즉 본 연구에서 개발된 QUAL-NIER 모델은 국내 수계에서 나타나는 BOD, TN, TP, Chl.a, TOC 등의 수질 변화를 안정적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 국립환경연구원(2001). 한강유역통합관리시스템 구축사업 - 오염부하 해석 및 수질관리모델 개발.
- 국립환경연구원(2004a). 낙동강수계 수중생태계 수질모델인자 조사(II).
- 국립환경연구원(2004b). 오염총량관리를 위한 하천수질모델의 개발(I). NIER NO. 2004-19-725.
- 김경섭, 안태진(2000). 오염총량관리를 위한 분석적 BOD 모델(AMB) 개발. 한국수자원학회지, **23**(6), pp. 775-782.
- 박석순, 이용석, 박민대(1991). 반응조 나열법을 이용한 하천모델 개발. 한국유수학회지, **24**(4), pp. 265-274.
- 박석순, 이용석(1993). 하천 무작위 현상의 확률 시뮬레이션을 위한 전산 모델 개발. 대한환경공학회지, **15**(3), pp. 569-582.
- 박석순, 이용석(1999). 대형 수계관리를 위한 수질모델의 개발과 적용. 대한환경공학회지, **21**(10), pp. 1837-1848.
- 서동일, 이은형(2003). 불연속적으로 흐르는 소하천을 위한 CAP 수질모델의 개발. 상하수도학회지, **17**(3), pp. 372-377.
- Ambrose, R. B., Wool, T. A., and Matin, J. L. (1993). *The Water Quality Analysis simulation Program, WASP5 Part A : Model documentation*, U. S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Bicknell, B. R., Imhoff, J. C., Kittle Jr., J. L., Donigan Jr., A. S., and Johanson, R. C. (1997). *Hydrological Simulation Program-Fortran, User's manual for version 11*. EPA/600/R-97/080, U. S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, GA.
- 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, U. S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Cerco, C. F. and Cole, T. (1995). *User's Guide to the CE-QUAL-ICM Three-Dimensional Eutrophication Model, Release Version 1.0*. Technical Report EL-95-15, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Chapra, S. C. and Pelletier, G. J. (2003). *QUAL2K : A Modelling Framework for Simulating River and Stream Water Quality - Documentation and Users Manual*. Civil and Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.
- Cole, T. M. and Wells, C. A. (2003). *CE-QUAL-W2 : A Two Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and water Quality Model, Version 3.2 User manual*. U. S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- Environmental Laboratory (1986). *CE-QUAL-R1: A Numerical One-Dimensional Model of Reservoir Water Quality; Users Manual*. Instruction Report E-82-1 (Revised Edition), U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Environmental Laboratory (1990). *CE-QUAL-RIV1: A Dynamic, One-Dimensional (Longitudinal) Water Quality Model for Streams: Users Manual*. Instruction Report E-90-1, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Havnø, K., Madsen, M. N., and Dørge, J. (1995). MIKE 11-A Generalized River Modelling Package, in *Computer Models of Watershed Hydrology*. Vijay P. Singh, (ed.), Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO.
- U. S. Army Corps of Engineers (1978). *Water Quality for River-Reservoir Systems(WQRRS)-User's Manual*. CPD-8, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.