

수질 신뢰도 분석을 위한 QUALKO2 모형의 Monte Carlo 해석

Monte Carlo Simulation Using QUALKO2 Model for Water Quality Reliability Analysis

한건연*, 최현구**, 권나영***, 임재태****

Kun Yeun Han, Hyun Gu Choi, Na Young Kwon, Jae Tae Im

요 지

1992년 한강수계법이 제정되면서 우리나라에 도입된 오염총량관리제는 현재 2차총량관리 시행계획수립 단계에 이르렀다. 오염총량제에서 수질모델은 수계구간별로 설정된 기준유량과 목표수질 조건을 달성하는 지를 판단할 수 있는 도구로 사용되며, 다양한 모델들이 사용되고 있다. 그 중 하천수질모형으로는 주로 QUAL2E, QUALKO, QUALKO2 모형으로 압축할 수 있다.

QUAL2E 모형은 1980년대에 개발되어 국내외로 널리 이용하고 있으나 SOD를 0차나 일정량으로 처리하였고, 부착조류에 의한 용존산소 변화와 부유 조류 사멸시 발생하는 유기물이 고려되지 않았다. 또한 용존산소가 부족한 상태에서 반응이 활발한 탈질화과정이 포함되지 않아 이들 반응에 의해 수질이 영향을 받는 하천에 적용하기에는 한계가 있었다. 그리고 QUAL2E 모형은 여러 개의 지류를 가진 대형 하천에는 적용하기 어려운 단점이 있다. 국내에서는 1999년 QUAL2E 모형에 WASP5의 장점을 접목시켜 QUALKO 모형을 개발하였다. 이 모형은 QUAL2E에 부유성 조류의 사멸로 인한 유기물의 내부증가, 탈질화 반응 및 부착식물의 광합성·호흡 과정을 추가한 것이다. 또한 QUAL2E 모형에서 BOD는 CBOD로 입력되고 모의되므로 bottle BOD의 개념이 결여되어 있으므로 이러한 문제점을 보완하고, 조류의 생산 및 사멸에 의한 내부생산 유기물 증가와 탈질화 반응 과정을 추가한 것이다.

우리나라에서 진행되고 있는 총량관리 대상물질은 2010년까지는 BOD₅이며, 2011년부터는 일부 지역에 총인이 포함될 예정이다. 2007년에 실험실에서 측정하는 BOD₅나 유기성 질소 또는 유기성 인을 그대로 입력하여 계산되고 출력할 수 있으며, 향후 오염총량제의 관리대상항목으로 논의되고 있는 TOC를 모의할 수 있는 QUALKO2가 개발되었다.

이에 본 연구에서는 향후 활용도가 클 것으로 기대되는 QUALKO2 모형에 기존 QUAL2E-UNCAS 모형에서 수행할 수 있는 불확실성 해석 기법인 Monte Carlo 모의를 가능하도록 모형을 수정하고자 한다. 실제 하천에서의 수질해석에 대한 단순한 표현인 수학적 모형은 불확실성을 내포하고 있으며, Monte Carlo 해석을 사용하여 모형의 불확실도 정량화와 매개변수의 불확실성을 통계학적으로 기술할 수 있다. 또한 각 지점에 대한 계산결과치들에 대해 빈도 및 누가빈도분포 값을 제시함으로써 모형 예측치들의 전반적인 분포경향을 평가할 수 있으며, 하천수질에 대해서 환경기준치를 위배할 가능성을 산정하는데 활용할 수 있다. 우리나라 실정에 맞는 QUALKO2 모형에 Monte Carlo 모의를 통해 신뢰도 기반의 수질해석을 수행하게 된다면 수질정책의 기초자료 제공에 기여할 것으로 판단된다.

핵심용어 : Qualko2, Monte Carlo 해석

* 정회원 · 경북대학교 토목공학과 교수 · E-mail : kshanj@knu.ac.kr
** 정회원 · 경북대학교 토목공학과 박사수료 · E-mail : honorguard99@msn.com
*** 경북대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : nyk8105@hotmail.com
**** 경북대학교 한국도로공사 함양성산 건설사업단 E-mail : ijti@ex.co.kr

1. 서론

CEQUAL, QUAL, WASP 계열의 복잡한 수질모델이 계속하여 개발되어 오고 있으나, QUAL2E 모형은 그 단순성과 사용의 편리함으로 인해 계속적으로 사용되고 있다. 그러나 미국 동북부지역의 대하천을 대상으로 개발된 EPA의 QUAL2E 모형은 유역이 광범위하고 강수량의 계절적 편차가 적어, 유량이 비교적 일정하게 흐르는 하천을 잘 예측할 수 있는 반면, 우리나라처럼 하상계수가 크고, 보 등 정체구간이 많은 국내 하천수역의 특성상 봄·가을철에 발생하는 조류와 BOD의 수질을 QUAL2E 모형으로는 제대로 재현할 수 없다.

국립환경과학원에서는 우리나라 실정에 맞도록 QUAL2E 모형을 QUALKO, QUAL-NIER, QUALKO2 모형으로 수정하였다. QUALKO2 모형은 실험실에서 측정하는 BOD₅와 유기성 질소, 유기성 인을 그대로 입력하고 출력될 수 있도록 최근에 수정된 모형이다. 이에 본 연구에서는 2단계 오염총량관리에서 대상항목이 BOD₅와 TP로 확대됨에 따라 향후 활용도가 클 것으로 예상되는 QUALKO2 모형에 기존 QUAL2E-UNCAS 모형의 불확실성 해석 기법인 Monte Carlo 모의를 가능하도록 모형을 수정하였다.

2. 모형의 특성

2.1 QUALKO2 Model

QUALKO2 모형이 기존 QUAL 계열의 모형과 다른 점은 부영양화 과정에서 발생하는 조류의 영향과 질산화 과정의 영향을 반영하고 TOC 모의가 가능하다는 점이다. 자연수체는 물론 환경기초시설 방류수에서도 질산화 세균은 충분히 존재하며, 실제 실험실에서 측정하는 총 BOD₅에는 질산화에 의한 BOD가 포함된다. 그러나 QUAL2E에서는 입력농도를 non-living CBOD₅(조체에 의한 algal BOD₅ 또는 질산화에 따른 nitrogenous BOD₅가 포함되지 않은 수중의 탄소성 BOD₅)로 인식하고 모의를 하게 된다. QUALKO2에서는 입력농도를 실험실에서 측정하는 BOD₅(Bottle BOD₅)로 인식한다. 또한 TOC 역시 비생물성 TOC는 물론 조체에 포함된 TOC를 포함하여 실험실에서 측정되는 총 TOC 농도를 입력·출력된다.

QUALKO2의 지배방정식은 질량보존식으로 QUAL2E의 지배방정식과 같다.

$$V \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial \left(A_c E \frac{\partial c}{\partial x} \right)}{\partial x} dx - \frac{\partial (A_c U_c)}{\partial x} dx + V \frac{dc}{dt} + s$$

여기서, V 는 체적이고, c 는 오염물의 농도, A_c 는 계산요소의 단면적, E 는 종확산계수, x 는 거리, U 는 평균유속, s 는 오염물의 오부적인 생성/소멸항이다.

QUALKO2의 수치해석은 QUAL2E에서의 음함수법(implicit method), 후방차분(backward difference), 전진소거(forward elimination), 후방대입(backward substitution)의 방법을 그대로 따른다.

2.2 Monte Carlo Simulation

수질모델에 사용되는 많은 모형들은 확정론적인 방법을 사용하고 있다. 확정론적인 모형은 물리적인 법칙과 초기, 경계조건 및 입력의 정량적인 표현 등에 기초한 이론적인 구조를 가지고 있다. 모형에 관련된 조건들이 적절하게 기술 되었을 때 확정론적 모형의 결과는 정확해야 하나, 대부분의 경우 수질문제의 복잡성 때문에 완벽한 모형은 실질적으로 불가능하다. 일반적으로 단순화, 기본과정, 근사화 과정 등이 계산결과에 도입되기 때문에 확정론적 모형으로부터 얻게 되는 해는 언제나 어느 정도의 불확실도를 가지게 된다.

신뢰도 기반 수질해석모형은 엄격하게는 확정론적 모형에 비해서는 물리적인 법칙에 보다 적게 기초로 하고 있으며, 모형 매개변수는 반드시 관측할 수 있는 물리적인 실체로서 정의되어야 하는 것은 아니고 통상적으로 최적화기법에 의해서도 결정될 수 있다. Monte Carlo 해석은 1차 오차해석에 존재하는 제한적인 가정 없이도 수질모형의 적용에서의 불확실도를 결정하는 이론적으로도 직접적인 기법이다. Monte Carlo 해석을 통하여 불확실한 매개변수가 통계학적 분포로 기술된다. Monte Carlo 모의는 모형 불확실도를 정량화하는데 그 이론과 적용에 대한 수학적 이해가 용이하기 때문에 가장 보편적인 방법으로 급격히 발전하고 있다.

Monte Carlo 모의는 시스템 내의 특정 위치에서의 상태변수에 대한 요약된 통계결과와 빈도분포를 제공하게 된다. 요약된 통계자료는 평균값, 최소값, 최대값, 범위, 표준편차, 변동계수, 왜곡도 계수 등이 제시된다.

3. 모형의 적용

신뢰도 기반의 수질해석을 위해 낙동강분류의 왜관에서 물금까지 2차 오염총량제 대상물질로 선정된 TP에 대해 Monte Carlo 모의를 실시하였다. 유량조건은 낙동강 오염총량제 기준 유량을 적용하였으며, 주요 모의지점은 표 1과 같이 5개의 주요 지류(금호강, 회천, 황강, 남강, 밀양강)합류 직하부와 물금 지점을 선정하였으며, 반응계수 자료(RXNC)와 점오염원 및 취수자료(FFPL)에 대하여 변화를 주어 분석하였다.

모형결과의 불확실성이 각 반복 계산과정에 대하여 미리 규정된 분포형으로부터 임의로 선정된 불확실한 모형 입력을 사용하여 확정론적 모형의 시뮬레이션을 수백 번 수행함으로써 결정된다. 반복기법에 의하여 요구되는 정확도를 도출하기에 충분한 반복계산의 수를 결정할 수 있다. 반복계산을 증대시킴에 따라 결과인 빈도분포의 수렴을 알아보기 위해 100, 200, 500, 1000, 2000 회 반복을 실행해 보았다.

표 1. 모의횟수별 TP 평균 농도

| 지 점 | 모의횟수별 평균 농도(mg/L) | | | | |
|---------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 100 | 200 | 500 | 1000 | 2000 |
| 금호강 합류부 | 0.269 | 0.267 | 0.269 | 0.268 | 0.268 |
| 회천 합류부 | 0.350 | 0.349 | 0.352 | 0.350 | 0.350 |
| 황강 합류부 | 0.331 | 0.329 | 0.332 | 0.331 | 0.331 |
| 남강 합류부 | 0.308 | 0.306 | 0.309 | 0.308 | 0.308 |
| 밀양강 합류부 | 0.282 | 0.281 | 0.284 | 0.282 | 0.282 |
| 물금 | 0.281 | 0.280 | 0.282 | 0.281 | 0.281 |

표 1에서는 각 지점에 대한 모의횡수별 T-P에 대하여 모의 평균값을 제시하였다. 그림 1은 모의값이 수렴했다고 판단된 2000회 모의 수행시 각 지점별 농도 분포 양상을 나타낸다.

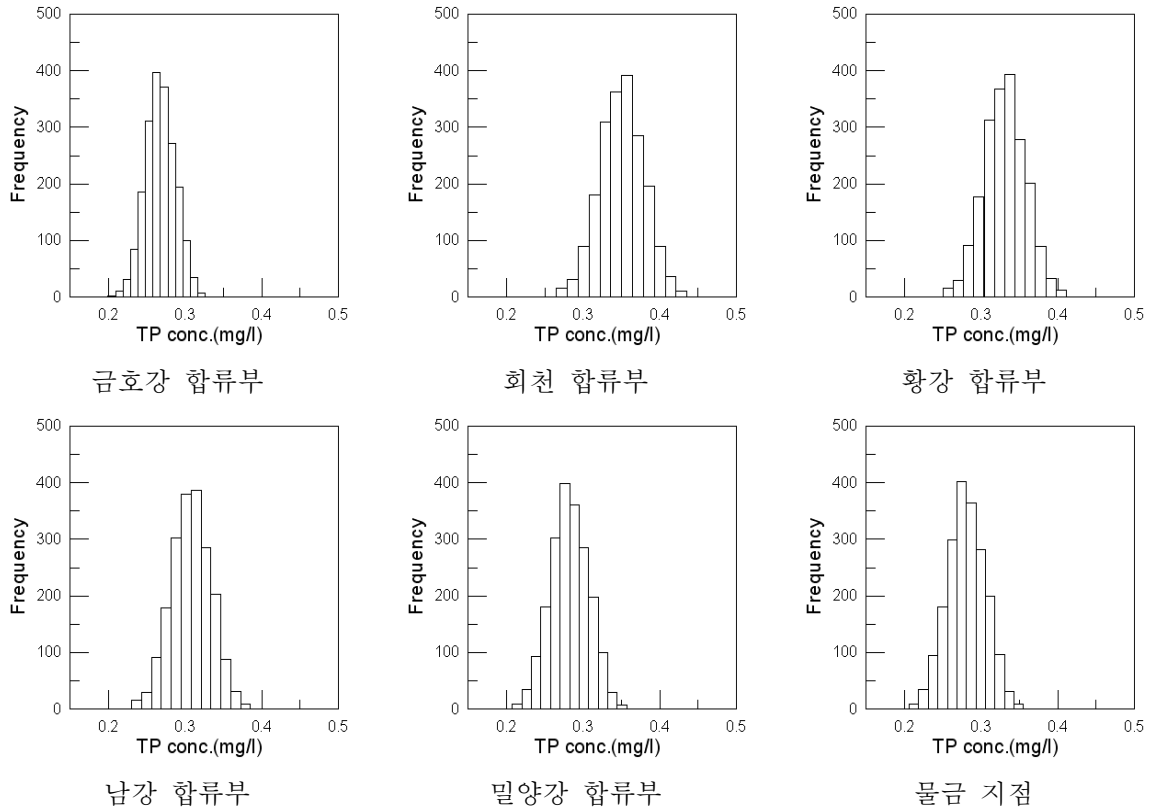


그림 1. 각 지점별 T-P 분포양상

본 연구에서 실시한 모의결과를 바탕으로 하천 주요지점에서 DO에 대한 비초과확률곡선과 BOD, TP에 대한 초과확률곡선을 도출할 수 있다. 그림 2는 DO에 대한 비초과확률곡선과 BOD에 대한 초과확률을 도출한 것으로 이러한 결과를 토대로 수계내의 주요 지점에서 실제 수질환경기준치에 대한 위배확률을 얻을 수가 있고, 이를 수질예보시스템에 활용할 수 있겠다.

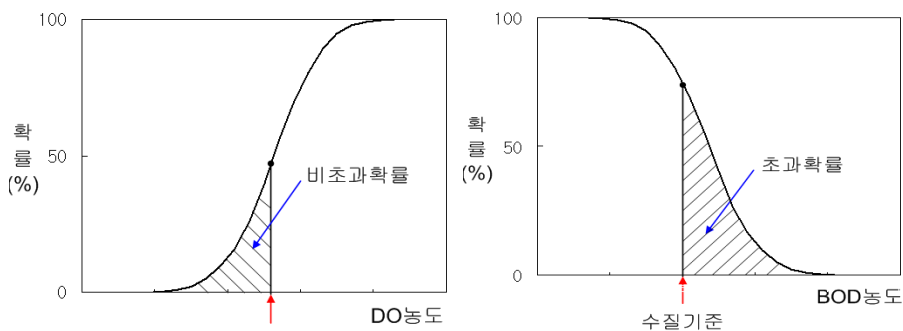


그림 2. 수질예보시스템 활용 예

4. 결 론

본 연구에서는 2단계 오염총량관리에서 대상항목이 BOD₅와 TP로 확대됨에 따라 향후 활용도가 클 것으로 예상되는 QUALKO2 모형에 기존 QUAL2E-UNCAS 모형의 불확실성 해석 기법인 Monte Carlo 모의를 가능하도록 모형을 수정하였다.

향후 본 연구에서 수정된 모형의 안정도를 높이는 과정을 거치면 오염총량제의 계획과 시행평가에 적용할 수 있을 것이며, 또한 주요 목표 지점에서 실제 환경기준치에 대한 위험도를 판단함으로써 목표하는 수질 기준을 달성하기 위하여 상류부의 댐 방류량의 조절이나 주요 오염원 및 지류로부터의 오염농도를 규제하는 것과 같은 최적의 수질 관리대책을 수립할 수가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2009년 낙동강 수계관리위원회환경기초사업의 “낙동강 수계 특성을 고려한 오염총량 지원 모델 시스템 구축”에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Berck, M.B., 1987. Water modeling: a review of the analysis of uncertainty. *Water Resources Research* 23, 1393-1441.
2. Linfield, B. and Barnwell, T. (1987). The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual, USEPA/600/3-87/007. USEPA, Env. Res. Lab., Athens, GA
3. Paliwal, R., Sharma, P., Kansal A., (2006). Water quality modelling of river Yamuna (India) using QUAL 2E-UNCAS. Accepted in *Journal of Environmental Management*.