

QUAL2E 모형에 대한 수리인자의 개선

Improvement of Hydraulic Parameters for QUAL2E Model

김상호*·이을래**

Sang Ho Kim, Eul Rae Lee

요 지

하천에 대한 수질해석을 위해 범용적으로 사용되는 QUAL2E 모형은 대상구간에 유사한 수리 특성을 가지는 구간(reach)을 설정하여 주어진 유량에 대해 동일한 수심과 유속을 가지도록 구성 되어 있다. 하지만 실제 자연하도에서는 여러 가지 수공구조물이나 지형변화로 인해 흐름변화가 매우 다양하게 발생하고 있다. 본 연구에서는 범용적으로 사용되고 있는 DWOPER 모형이나 HEC-RAS 모형과 같은 1차원 수리해석모형의 부등류 모의결과를 QUAL2E 모형에서 활용함으로써 실제 하천에서 발생하는 국부적인 흐름특성을 수질해석에 반영할 수 있는 수리연계모듈을 개발하였으며, 이를 한강의 팔당댐 하류구간에 대해 적용하였다.

핵심용어 : QUAL2E 모형, 수질해석, 수리인자

1. 서 론

최근 주요 하천에 대한 자동수질측정망이 구축되면서 하천에서의 보다 정확한 수질예측에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다. 현재 하천에서의 1차원적 수질해석을 위해 범용적으로 사용되는 QUAL2E 모형은 대상구간에 유사한 수리특성을 가지는 구간(reach)을 설정하여 주어진 유량에 대해 구간별 멱함수 식을 이용하여 수심과 유속을 결정하도록 구성되어 있다. 이러한 방법은 구간 별로 동일한 유속과 수심이 형성되는 것으로 가정하게 되어 자연하도의 다양한 흐름변화, 특히 자연하천의 보나 낙차공으로 인한 국부적인 흐름상태를 반영하기 어려우며, 실제 흐름특성과의 차이로 인한 수질해석 결과의 차이도 발생할 것이다.

따라서 본 연구에서는 실제 자연하도의 단면변화를 반영한 부등류 흐름해석 결과를 QUAL2E 모형에 적용할 수 있는 연계모듈을 개발하였다. 이러한 연계모듈에 적용되는 1차원 부등류 해석모형은 실시간 수리해석모형으로 개발된 DWOPER 모형과 범용 프로그램으로서 많이 사용되고 있는 HEC-RAS 모형의 모의결과를 QUAL2E 모형에서 활용할 수 있도록 하였다. 아래의 그림은 본 연구에서 QUAL2E 모형을 위해 개발된 수리해석모듈과 최적화기법을 적용한 연계모듈을 포함하는 모형 구조도를 나타내고 있다. 이와 같이 본 연구에서 개발된 연계모듈을 이용한 QUAL2E 모형을 한강의 팔당댐 하류부에 적용함으로써 모형에 대한 활용성을 검토하였다.

* 정회원·상지대학교 이공과대학 건설시스템공학과 조교수·E-mail : kimsh@sangji.ac.kr

** 정회원·한국수자원공사 물관리센터 선임연구원

2. QUAL2E 모형의 이론

2.1 기본 이론

QUAL2E 모형은 하천에서의 1차원 수질해석을 위한 수치모형으로서 13개 수질오염인자의 시뮬레이션이 가능하고 점오염원 및 비점원 오염원, 하천의 지류 및 용수취수 등을 다양하게 정상상태 또는 조류의 유사 동적상태로서 모델링할 수 있다. 하천에서의 물질전달거동인 유체이동과 확산은 1차원적 해석에 의한 식 (1)을 기본식으로 사용한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial (UC)}{\partial x} + Z \quad (1)$$

여기서 식 (1)의 좌측항은 어느 지점에서 시간에 대한 농도변화를 나타내며, 우측항은 순서대로 확산에 의한 물질이동항, 유체이동항, 각 오염물질에 대한 지배함수(forcing function)를 포함한 유출입항을 각각 표시하고 있으며 정상상태인 경우에는 $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ 로서 표현된다.

2.2 수리연계모듈의 개발

하천에서의 1차원적 수질해석을 위해 범용적으로 사용되는 QUAL2E 모형은 대상구간에 유사한 수리특성을 가지는 구간(reach)을 설정하여 주어진 유량에 대해 식 (2)과 (3)과 같은 구간별 멱함수 식을 이용하여 수심과 유속을 결정하도록 설정되어 있다.

$$U = aQ^b \quad (2)$$

$$H = \alpha Q^\beta \quad (3)$$

여기서, a, b, α, β : 하천의 수리특성상수

H : 평균수심 U : 평균유속 Q : 유량

이러한 방법은 구간별로 동일한 유속과 수심이 형성되는 것으로 가정하게 되어 자연하도에서 실제 발생하는 다양한 흐름변화를 반영할 수 없으며, 이로 인한 실제 흐름과 모의 흐름간의 차이로 인한 수질해석 결과의 차이도 간과할 수 없을 것이다.

따라서 본 연구에서는 실제 자연하도의 단면자료를 이용한 부등류 흐름해석 결과의 수리자료를 QUAL2E 모형에 이용할 수 있는 연계모듈을 개발하였다. 이러한 연계모듈에 적용되는 1차원 부등류 해석모형은 실시간 수리해석모형으로 개발된 DWOPER 모형과 범용 프로그램으로서 많이 사용되고 있는 HEC-RAS 모형이며, 이들 모형의 모의결과를 QUAL2E 모형에서 활용할 수 있도록 하였다. 이와 함께 수질모형을 구성하고 있는 주요 매개변수들에 대한 최적 매개변수를 도출하기 위해 Broyden, Fletcher, Goldfarb 및 Shanno 등이 개발한 최적화 알고리즘인 BFGS 기법을 이용하여 DO와 BOD에 주로 영향을 미치는 K_1, K_3, K_4 에 대한 최적반응계수를 도출할 수 있는 알고리즘을 구축하였다. 그림 1은 본 연구에서 QUAL2E 모형을 위해 개발된 수리해석모듈과 최적화 기법을 적용한 모듈과의 모형에 대한 연계구조도를 나타내고 있다.

3. 실제유역에 대한 적용

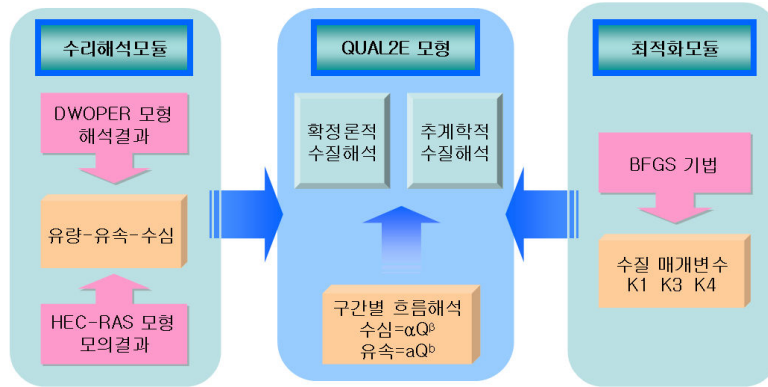


그림 1. QUAL2E 모형에 대한 연계모듈의 적용

본 연구에서 개발된 수리연계모듈을 적용하기 위해 한강하류부에 대해 수질해석모형을 구축하였다. 그림 2는 대상구간에 대한 구간별 모식도를 나타내고 있는데, 그림에서 보는 바와 같이 팔당댐 직하류부를 상류단으로 하고, 하류단은 한강대교로 선정하여 총 모의구간은 34.5km 구간이며, 길이 0.5km의 element 69개로 구성하고 다시 69개의 element를 지류 유입지점 및 잠실 수중보 등을 고려하여 동일구간 내에서는 수리학적으로 유사한 특성을 갖도록 8개의 구간으로 구분하였다. 본류로 유입되는 지천은 점오염원으로 유입되는 것으로 하였다.

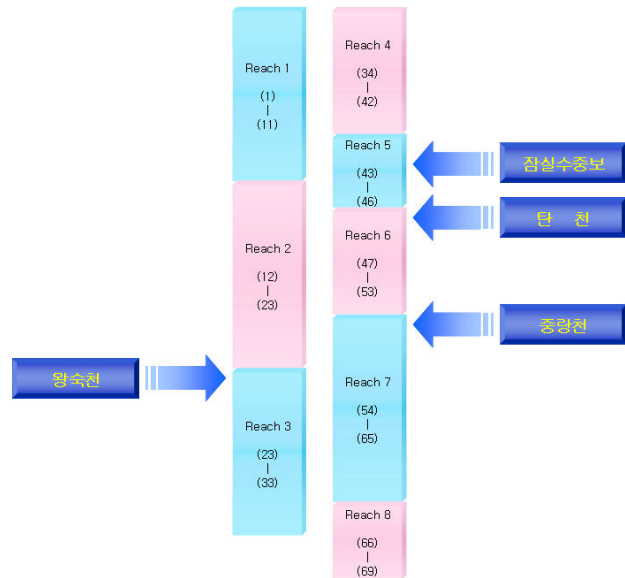


그림 2. 수질모의를 위한 대상구간 모식도

3.1 민감도 분석

QUAL2E 모형은 구간(Reach)별 유속과 수심을 결정하기 위해 식 (2), (3)의 수리특정상수를 이용한다. 이 때 구간별 수리특정상수 a , b , α , β 가 모의결과에 미치는 영향을 살펴보기 위해 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석은 모형의 적용결과에 미치는 각 매개변수들의 중요성을 체계적으로 파악하려는 과정으로서 각 매개변수들을 적용범위 내에서 변화시키면서 수질변수의 모의값에 대한 정량적인 변화를 살펴보는 것이다. 이 경우 민감도가 높은 매개변수로부터 민감도가 낮은 매개변수의 순으로 추정해 나가는 방법이 가장 효율적인 방법이지만 이러한 매개변수의 민감도는 적용하는 대상과 매개변수 추정과정에 따라 변화하는 것으로 알려져 있어 일반적인 민감도 순위를 제시하기 어렵다. 이러한 민감도는 식 (4)와 같이 구할 수 있으며, 식 (5)와 같이 정규화된 형태로 사용하기도 한다.

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (4)$$

$$S_N = \frac{\Delta y/Y}{\Delta x/X} \quad (5)$$

여기서, X 는 입력 매개변수의 기본값, Y 는 출력 변수의 기본값, Δx 는 입력 매개변수에 대한 변화량 그리고 Δy 는 출력 변수에 대한 변화량을 의미한다. 그림 3과 4는 QUAL2E 모형의 수리특성 상수 가운데 유속과 관련된 변수인 a , b 를 구간 4에 대해서만 각각 20% 변화시켰을 경우 DO와 BOD에 대한 정규화된 민감도를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 구간 4에서부터 정규화된 민감도가 점차 증가하기 시작하여 하류구간에 전체적으로 영향이 비교적 크게 나타나고 있었다. 하지만, 수심관련 변수인 α , β 에 대해서는 민감도가 비교적 작은 것으로 나타났다.

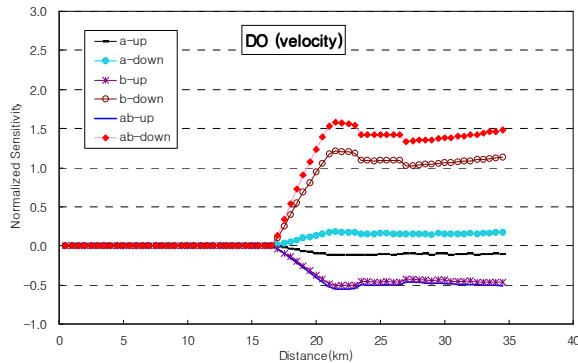


그림 3. DO에 대한 정규화된 민감도

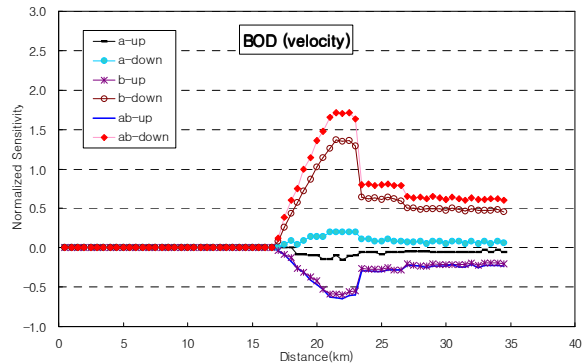


그림 4. BOD에 대한 정규화된 민감도

3.2 모의결과

기존의 QUAL2E 모형에 사용되는 식 (2), (3)과 같은 유량계수를 산정하기 위해 2000년부터 2004년에 걸친 월 평균 팔당댐 방류량 자료와 한강대교의 수위자료로부터 수중보의 영향을 고려하여 부등류 해석을 실시하고, 하도내 각 지점에서의 수심, 통수단면적, 유속, 경심 등의 수리자료로부터 구간별 회귀분석을 실시하여 유량계수 a , b , α , β 를 산정하였으며, 이를 이용하여 수질해석을 실시하였다. 또한 본 연구에서 개발된 1차원 범용해석 모형인 DWOPER 모형의 모의결과를 이용할 수 있는 수리연계모듈을 적용한 모의결과와 비교하였다. 그림 5는 2004년 7월의 실제 홍수사상에 대한 유량자료를 이용하여 부등류 해석을 통한 구간별 유량계수 a , b , α , β 를 산정하였을 때 대상구간에 적용되는 수심자료와 실제 대상구간에서 나타나는 수심의 변화양상을 비교하고 있으며, 그림 6은 유량계수 a , b , α , β 를 이용하였을 때 사용되는 유속과 수심에 대한 실제 부등류 해석결과와의 변화양상을 나타내고 있다.

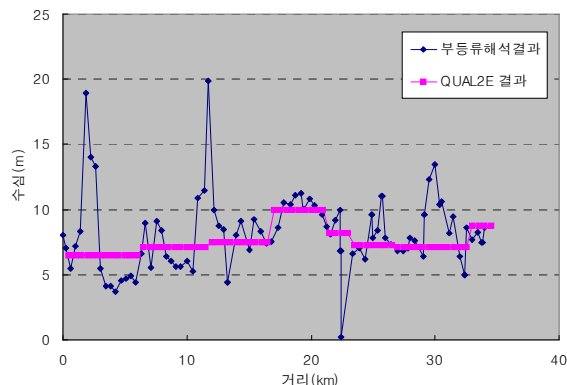


그림 5. 2004년 7월 사상에 대한 수심 비교

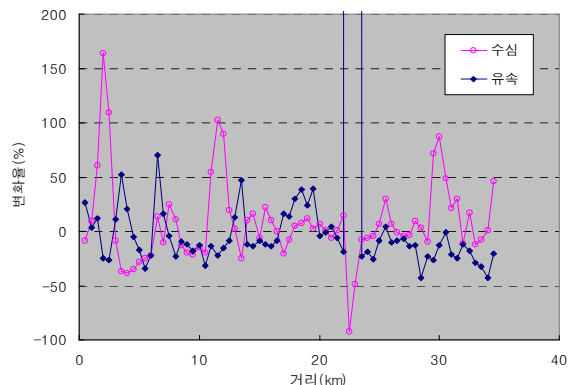


그림 6. 2004년 7월 사상에 대한 수리인자 변화율

그림에서 보는 바와 같이 구간별 동일 유량계수를 사용하였을 때의 수심과 유속자료는 실제 부등류 해석결과와는 매우 다른 양상을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 그림 7과 8은 구간별 유량계수를 사용하였을 때의 모의결과와 지점별 수심과 유속자료를 부등류 해석결과에서 사용하였을 때의 모의결과를 비교한 그림이다. 잠실수중보를 중심으로 상류구간에서는 두 사상 모두 DO와 BOD가 유사한 결과를 나타내고 있었지만, 잠실수중보 지점 이후부터 수질의 양상이 매우 다르게 나타나고 있었다. 구간별 유량계수를 사용하였을 때에는 잠실수중보의 낙차 및 유속으로 인한 DO의 재폭기 효과가 나타나지 않았지만, 부등류 해석결과를 그대로 적용하였을 때에는 재폭기 효과가 적절하게 나타남을 확인할 수 있었다.

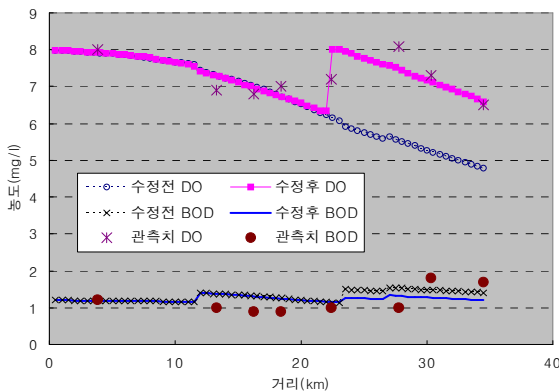


그림 7. 2000년 9월 사상에 대한 DO-BOD 모의결과

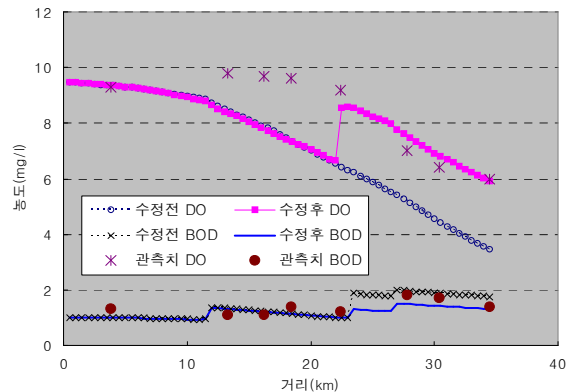


그림 8. 2004년 9월 사상에 대한 DO-BOD 모의결과

6. 결론

하천에서의 수질해석을 위해 범용적으로 사용되는 QUAL2E 모형은 대상구간별로 동일한 수리 특성을 가지도록 설정되어 있어 자연하도에서 발생하는 다양한 흐름변화나 국부적인 흐름상태를 자세히 반영하기 어려운 단점을 가지고 있다. 이와 같은 흐름특성의 차이는 수질해석 모의결과와 정확성이 떨어지게 되는 결과를 초래할 것이다. 따라서 본 연구에서는 실제 자연하도의 단면변화를 반영한 부등류 흐름해석 결과를 QUAL2E 모형에 이용할 수 있는 연계모듈을 개발하였다. 이러한 연계모듈에 적용되는 1차원 부등류 해석모형은 실시간 수리해석모형으로 개발된 DWOPER 모형과 범용 프로그램으로서 많이 사용되고 있는 HEC-RAS 모형의 모의결과를 활용할 수 있도록 하였으며, 이를 한강의 팔당댐 하류구간에 적용하여 모형에 대한 활용성을 살펴보았다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2005-003-D00400)을 받아 연구되었기에 사의를 표합니다.

참고문헌

- 한건연, 김상호(1997). “낙동강에서의 신뢰도 해석에 의한 수질예보시스템의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 제30권, 제4호, pp. 411-420.
- 해양수산부(2001, 2002). **한강-임진강 유역에 대한 조위영향연구 (I), (II)**, 한국해양연구원/한국건설기술연구원.