

부등류해석을 이용한 QUAL2E 모형의 개선

김상호[†] · 최현상^{*}

상지대학교 이공과대학 건설시스템공학과
^{*}한국건설기술연구원 유비쿼터스국토연구부

Improvement of QUAL2E Model using Nonuniform Flow Analysis

Sang Ho Kim[†] · Hyun Sang Choi^{*}

Department of Civil Engineering, Sangji University

^{*}Ubiquitous Land Implementation Research Dept., Korea Institute of Construction Technology

(Received 28 September 2006, Accepted 29 November 2006)

Abstract

Recently, as water pollution accidents in rivers have increased, there is an increased interest in water quality forecast with accurate simulation. QUAL2E model, widely used for water quality analysis, uses the same hydraulic characteristics, such as depth and velocity, in a reach. The flow of the river is changed by various hydraulic constructions or by topography in a real river channel. In this study, a hydraulic connection module is developed to consider flow variations of river channels in QUAL2E model. The module uses the simulations results of non-uniform flow of a 1-D hydraulic model such as DWOPER or HEC-RAS. The improved QUAL2E model with this module was applied to a downstream section of Paldang Dam on the Han River. The results show the variation of water quality very well in a reach where flowing vary abruptly, like the Jamsil submerged weir.

keywords : Han River, Hydraulic parameter, QUAL2E model, Water quality analysis

1. 서론

국민 생활수준이 높아짐에 따라 깨끗한 물에 대한 사용자의 요구는 점차 높아지고 있다. 하지만 산업이 점점 고도화되면서 화학물질의 종류는 날로 늘어가고 있으며, 하천에서의 수질사고는 1991년 낙동강 폐놀 유출사고와 1994년 낙동강 수질오염사고 이후 최근 5년간 감소추세에 있었으나 2005년부터 다시 증가한 것으로 나타났다(환경부, 2006). 이러한 수질오염 사고는 교통사고나 기계고장과 같은 인적사고로 인한 발생이 전체 사고의 상당부분을 차지하고 있다. 특히 2005년과 2006년에 중국 중화강에서 발생했던 오염사고는 하천에서의 수질오염이 사회적으로 얼마나 큰 파장을 일으킬 수 있는지 단적으로 보여준 예일 것이다.

이와 같은 수질오염사고는 하천에 대한 상시감시체제와 조기경보체제의 구축에 대한 필요성을 대두시켰으며, 이를 통해 전국 주요 상수원과 오염사고 취약지역 등에 대해 수질을 상시 관리할 수 있는 수질자동측정망을 단계적으로 설치하여 불시에 발생할 수 있는 수질오염사고에 신속히 대응하고자 하였다. 현재 우리나라에서는 홍수 예·경보, 이·치수 계획수립 등을 위해 많은 수위, 우량관측소를 각

기관별로 운영하고 있으며, 하천에서의 수질오염사고 예방을 위해 조기경보체제를 갖춘 40개소의 수질자동측정망을 4대강 유역에 설치하여 운영하고 있다.

최근 주요 하천에 대한 자동수질측정망이 구축되면서 하천에서의 보다 정확한 수질예측에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 하천에서의 1차원적 수질해석을 위해 QUAL2E 모형이 범용적으로 사용되고 있는데, 이에 관한 연구사례를 살펴보면 O'Conner(1960), O'Conner et al.(1970), Brown et al.(1987) 등에 의해 모형이 발전된 이후 국내에서 한 등(1995), 백 등(1995)과 오 등(1996)은 각각 한강 하류부와 북한강 본류에, 김 등(2002b)과 김 등(2004)은 탐진강과 안양천 유역에 QUAL2E 모형을 적용하여 수질해석을 실시한 바 있다. 최 등(2000)은 GIS 프로그램인 ArcView를 이용하여 하천의 수질모델링을 위한 통합환경 구축을 위해 QUAL2E 모형을 대상으로 실시한 바 있으며, 고 등(2005)은 정상상태 모형인 QUAL2E 모형과 비정상상태 모형인 CE-QUAL-RIV1 모형을 대청댐 하류 금강본류에 동일한 모의조건을 적용하여 결과에 대한 비교분석을 실시하였다. 박 등(2005)은 영산강의 수위관측망 자료와 수질관측망 자료를 이용하여 수질모델을 구축하고 장래수질예측을 실시하였고, 경 등(2006)은 경안천 유역의 최적 수질 측정망 구성을 위해 QUAL2E 모형을 이용하여 모의한 바 있다.

하지만 기존의 QUAL2E 모형은 전체 대상구간을 요소(element)로 구성하고 다시 수리학적으로 유사한 흐름특성

[†] To whom correspondence should be addressed.
kimsh@sangji.ac.kr

을 가진 구간(reach)으로 구분하고 있다. 각 구간에서는 동일한 유속과 수심이 형성되는 것으로 가정하게 되어 자연하도의 다양한 흐름변화, 특히 자연하천의 보나 낙차공으로 인한 국부적인 흐름상태를 반영하기 어려우며, 이로 인한 실제 흐름특성과의 차이는 수질모의 해석결과에도 영향을 미칠 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 바 있는 DWOPER 모형과 범용 프로그램으로서 많이 사용되고 있는 HEC-RAS 모형의 모의결과를 QUAL2E 모형에서 활용할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 개발된 연계모듈을 이용한 QUAL2E 모형은 한강의 팔당댐 하류부에 적용하여 모형에 대한 활용성을 검토하였으며, 향후 국내 다양한 하천에 적용함으로써 보다 정확한 수리해석 결과를 바탕으로 한 수질해석이 가능할 것으로 기대된다.

2. QUAL2E 모형의 이론

2.1. 기본 이론

QUAL2E 모형은 정상상태인 하천에서의 1차원 수질해석을 위한 수치모형으로서 13개 수질오염인자에 대한 모의가 가능하고 점오염원 및 비점원 오염원, 하천의 지류 및 용수취수 등을 다양하게 정상상태 또는 조류의 유사 동적상태로서 모델링할 수 있다. 하천에서의 물질전달거동인 유체 이동과 확산은 1차원적 해석에 의한 식 (1)을 기본적으로 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 C 는 단면평균 오염물의 농도, D 는 종확산계수, U 는 단면평균유속, t 는 시간, x 는 흐름방향의 거리를 나타내고 있다. 식 (1)의 좌측항은 어느 지점에서 시간에 대한 농도변화를 나타내며, 우측항은 순서대로 확산에 의한 물질 이동항, 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. 부등류해석을 통한 수리인자의 개선

하천에서의 1차원적 수질해석을 위해 범용적으로 사용되는 QUAL2E 모형은 대상구간에 유사한 수리특성을 가지는 구간(reach)을 설정하여 주어진 유량에 대해 식 (2)와 (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

일반적으로 QUAL2E 모형을 적용함에 있어 가장 어려움을 겪는 부분은 자연하천에서의 대상구간에 대해 유사한 수리특성을 가지는 구간을 결정하는 것이다. 이를 위해 여러 가지 유량등급별 자료에 대한 부등류 해석을 실시하고 그 결과를 토대로 구간을 결정하는데 자연하도에서 자유롭게 변하는 흐름결과에 대해 유사한 구간을 결정하는 것은 매우 어려운 일이 아닐 수 없다. 또한 식 (2)와 (3)의 수리특성상수인 a , b , α , β 를 구간별로 결정하여야 하는데, 이를 위해 조 등(1996)은 표준측차법에 의한 1차원 에너지 방정식을 해석하는 HEC-2 모형을 이용하여 대상구간에 대한 수리학적 부등류 해석을 실시하여, 수심, 통수단면적, 유속, 경심 등의 자료를 구한 후 그 결과를 수리학적으로 유사한 특성을 가진 것으로 판단되는 구간별로 회귀분석을 실시하여 수리학적 변수들을 구하였다. 전 등(2004)은 소구간 내 횡단면의 가정된 수면표고에 대해 통수면적, 통수반경 및 평균수심을 계산한 후 이들 단면 특성값들에 상응하는 평균유속과 유량을 구하였으며, 이와 같은 방법으로 구한 평균유속, 평균수심 및 유량자료에 대해 회귀분석을 적용하여 유량계수를 산출하였다.

이러한 방법들은 회귀분석 과정에서 많은 불확실성을 내포하게 되며, 작업과정도 많은 반복을 요하게 된다. 또한 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 연계모듈은 수리해석 결과를 토대로 한 구간결정 과정과 수리특성상수인 a , b , α , β 를 결정하는 복잡한 과정을 생략하게 하며, 구간별로 동일한 수리특성을 갖게 하는 기존 모형과는 달리 각 요소별 수리특성을 갖게 함으로써 실제 하천흐름을 QUAL2E 모형에 반영하게 된다. 이를 위해 적용되는 1차원 부등류 해석모형은 범용 프로그램으로 널리 사용되고 있는 DWOPER 모형과 HEC-RAS 모형을 선정하여 모의결과를 이용할 수 있도록 하였다. 부등류 해석모형의 모의결과를 잘 반영하기 위해서는 QUAL2E 모형의 각 요소를 짧게 구성할 경우 실제 하도의 흐름 변화를 보다 잘 반영할 수 있게 된다.

이와 함께 수질모형을 구성하고 있는 주요 매개변수들에 대한 최적값을 도출하기 위해 Broyden, Fletcher, Goldfarb 및 Shanno 등이 개발한 최적화 알고리즘인 BFGS 기법(백 등, 1995)을 이용하여 DO와 BOD에 주로 영향을 미치는

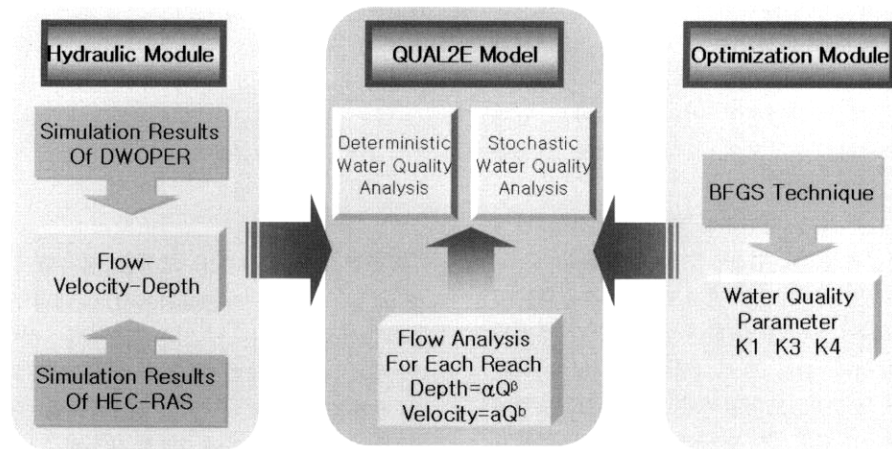


Fig. 1. Application of link module for QUAL2E model.

탈산소계수 K1, BOD의 침전을 K3, 하상산소요구량 K4에 대한 최적반응계수를 도출할 수 있는 알고리즘을 구축하였다. 재포기 계수 K_2 는 O'Conner 등(1958)의 식을 이용하여 하천의 수심과 유속의 함수로 이용되도록 하였다. Fig. 1은 본 연구에서 QUAL2E 모형을 위해 개발된 수리해석모듈과 최적화 기법을 적용한 모듈과의 모형에 대한 연계구조도를 나타내고 있다.

3. 실제유역에 대한 적용

본 연구에서 개발된 수리연계모듈을 적용하기 위해 한강 하류부에 대해 수질해석모형을 구축하였다. Fig. 2는 대상구간에 대한 구간별 모식도를 나타내고 있는데, 그림에서 보는 바와 같이 팔당댐 직하류부를 상류단으로 하고, 하류단은 한강대교로 선정하여 총 모의구간은 34.5 km 구간이며, 길이 0.5 km의 요소 69개로 구성하고 이 가운데 지류 유입지점 및 잠실 수증보 등을 고려하여 동일구간 내에서

는 수리학적으로 유사한 특성을 갖도록 8개의 구간으로 구분하였다. 본류로 유입되는 지천은 점오염원으로 유입되는 것으로 하였다. 대상구간에 대한 흐름해석모의는 한강 하류부에 대해 부정류해석을 실시하여 실측자료와의 검증을 통해 구축된 DWOPER 모형의 결과를 이용하였다(김 등, 2002a; 김 등, 2005).

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.

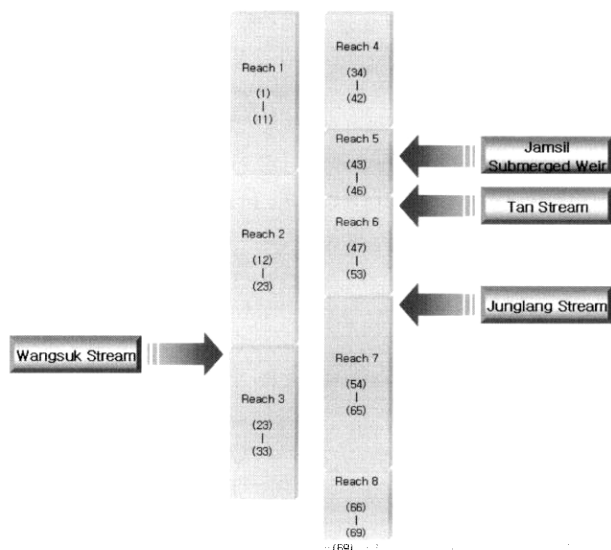


Fig. 2. Structure for QUAL2E model.

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{4}$$

$$S_N = \frac{\Delta y / Y}{\Delta x / X} \tag{5}$$

여기서, X는 입력 매개변수의 기본값, Y는 출력 변수의 기본값, Δx 는 입력 매개변수에 대한 변화량 그리고 Δy 는 출력 변수에 대한 변화량을 의미한다. Fig. 3과 4는 QUAL2E 모형의 수리특정상수인 a, b, α, β 를 구간 4에 대해서만 각각 20% 증가시키고 감소시켰을 경우 DO와

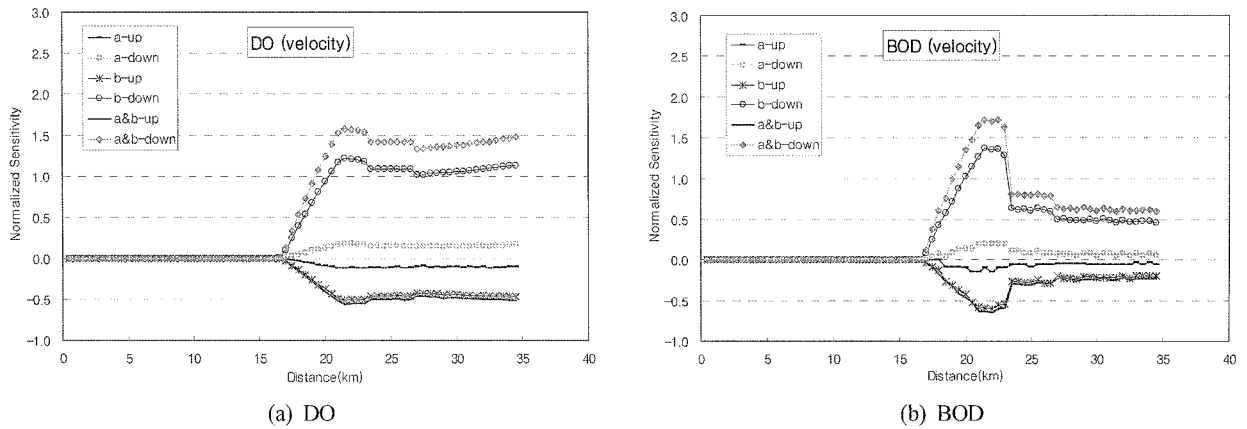


Fig. 3. Normalized sensitivity of velocity parameter.

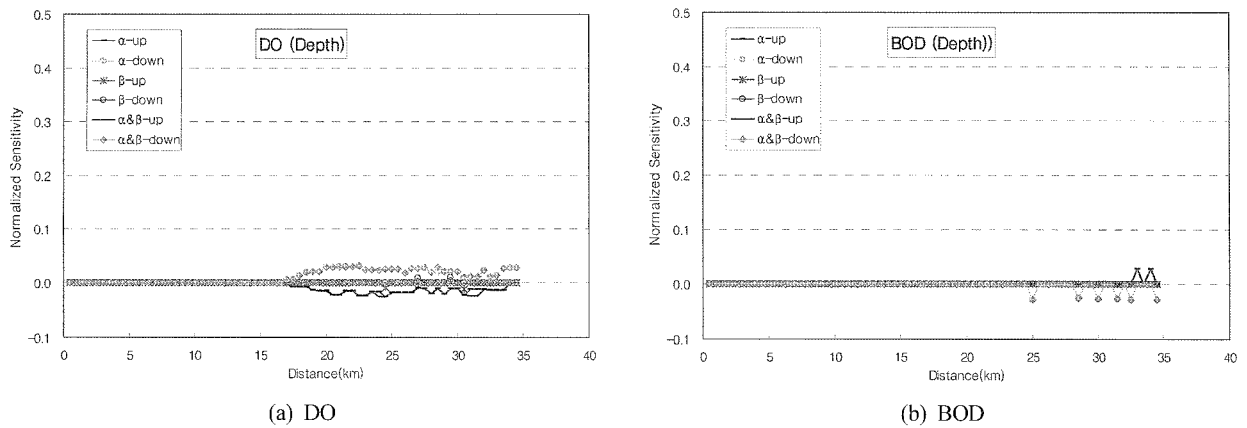


Fig. 4. Normalized sensitivity of depth parameter.

BOD에 대한 정규화된 민감도를 나타내고 있다. Fig. 3에서는 유속관련 변수인 a , b 에 대해 변동을 주었을 경우에 대한 결과를 나타내고 있는데, 그림에서 보는 바와 같이 구간 4에서부터 정규화된 민감도가 점차 증가하기 시작하여 하류구간 전체에 대한 영향이 비교적 크게 나타나고 있었다. 하지만, 수심관련 변수인 α , β 에 대한 결과를 나타내고 있는 Fig. 4에서는 전체적으로 민감도가 매우 작은 것으로 나타났다. 이와 함께 총 질소와 총 인에 대한 민감도 분석결과 그 영향이 거의 없는 것으로 나타나 본 연구에서 제외하였다.

3.2. 모의결과

QUAL2E 모형에 대한 수리특성의 부여를 위해 식 (2)와 (3)의 유량계수를 산정하였다. 2000년부터 2004년까지 월 평균 팔당댐 방류량 자료와 한강대교의 수위자료로부터 수증보의 영향을 고려하여 부등류 해석을 실시하고, 하도내 각 지점에서의 수심, 통수단면적, 유속, 경심 등의 수리자료로부터 구간별 회귀분석을 실시하여 수리특성계수 a , b , α , β 를 Table 1과 같이 산정하였으며, 이를 이용하여 수질 해석을 실시하였다. 또한 본 연구에서 개발된 수리연계모형을 이용하여 1차원 범용해석 모형인 DWOPER 모형의 모의 결과를 이용한 QUAL2E 모형의 모의결과와 비교하였다.

Table 1. Hydraulic parameter for study area

Reach Number	a	b	α	β
1	0.0054	0.6931	2.0955	0.1663
2	0.0005	0.9586	6.1117	0.0224
3	0.0003	0.9903	7.3702	0.0017
4	0.0002	0.7931	7.6782	0.0044
5	0.0002	0.9932	7.8603	0.0059
6	0.0003	1.0009	6.5990	0.0147
7	0.0003	1.0023	6.6807	0.0090
8	0.0003	1.0003	8.7540	0.0003

Fig. 5는 2004년 7월의 실제 홍수사상에 대한 부등류 해석결과와 구간별 수리특성계수 a , b , α , β 를 이용하여 QUAL2E 모형을 수행하였을 때 대상구간에 적용되는 수심 자료를 비교한 그림이며, Fig. 6은 QUAL2E 모형에서 적용되는 유속과 수심에 대한 실제 부등류 해석결과와 변화정도를 각 지점별로 비교한 결과를 나타내고 있다. 특히 상류단으로부터 약 22.45 km에 위치한 잠실수증보는 수심이 매우 작고 유속이 크게 나타나는 수리특성을 가지고 있는데, 수심의 변화율은 -100% 가깝게 나타나고 있었으며, 유속은 200%를 훨씬 넘는 것으로 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이 QUAL2E 모형에서 구간별로 동일한 수리특성계수를

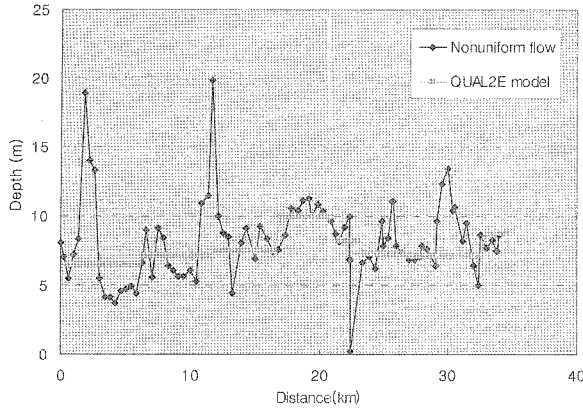


Fig. 5. Depth for July 2004 event.

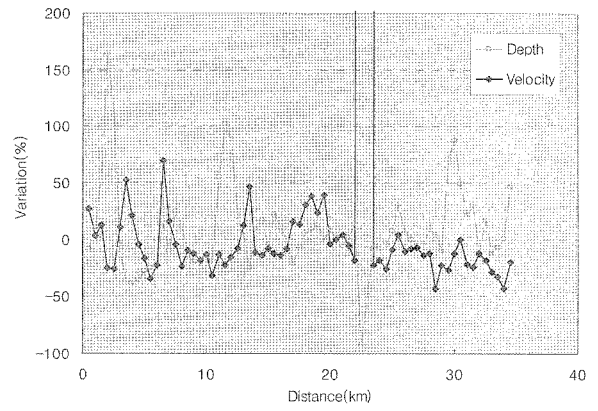


Fig. 6. Variation of hydraulic variables for July 2004 event.

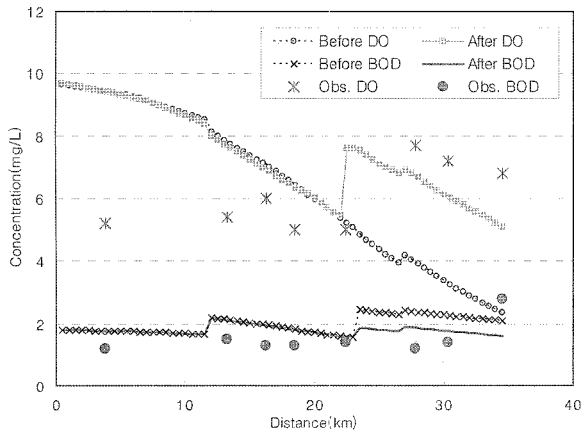
사용함에 따라 수집과 유속자료는 실제 부등류 해석결과와는 매우 다른 양상을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

대상구간에 대한 부등류 해석결과를 사용하였을 때와 QUAL2E 모형의 구간별 수리특성계수를 사용하였을 때의 모의결과를 살펴보기 위해 2000년 8월과 9월 그리고 2004년 7월과 9월 사상에 대해 수질모의를 실시하였다. 사상별로 월 평균 유량자료를 이용하였으며, 주요 지점별로 관측된 월평균 수질자료를 이용하여 모의에 대한 정확도를 검

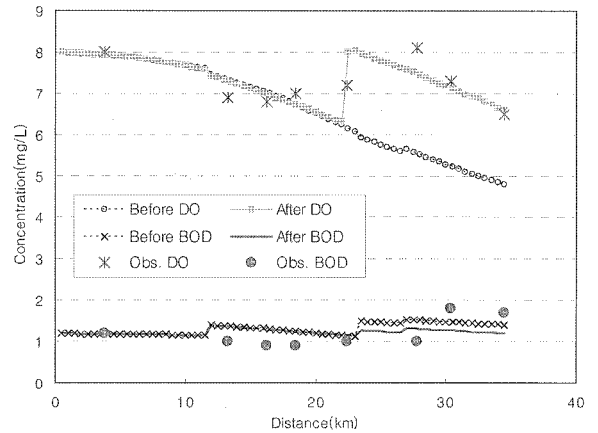
증하였다.

모의결과는 Fig. 7에 사상별로 나타내었는데, 잠실수중보를 중심으로 상류구간에서는 DO와 BOD가 사상별로 약간씩 차이를 보이고 있지만 전체적으로 유사한 결과를 나타내고 있었다. 그러나 잠실수중보 지점 이후부터 수질의 양상이 매우 다르게 나타나고 있었다.

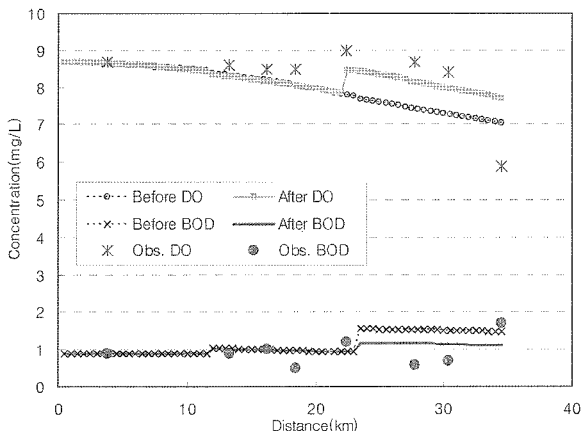
이러한 결과는 QUAL2E 모형의 구간별 수리특성계수를 사용하였을 때에는 잠실수중보에서 발생하는 흐름 낙차 및



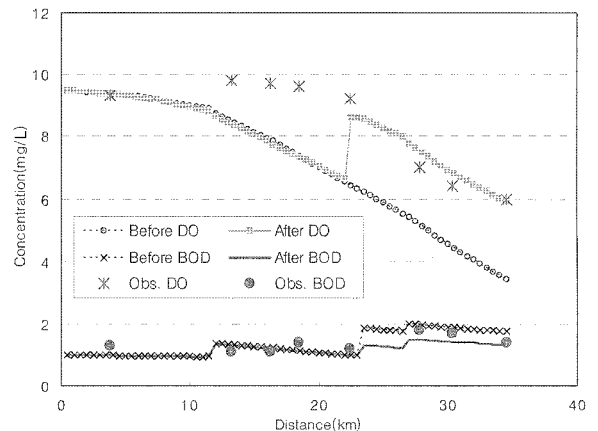
(a) Aug. 2000



(b) Sep. 2000



(c) July 2004



(d) Sep. 2004

Fig. 7. Comparison of simulation results.

유속으로 인한 DO의 재폭기 효과가 나타나지 않았지만, 부등류 해석결과를 본 연구에서 개발된 수리연계모듈을 통해 적용하였을 때에는 재폭기 효과가 적절하게 나타남을 확인할 수 있었다. 잠실수중보에서의 재폭기 효과는 QUAL2E 모형 내 댐에 의한 재폭기 기능(Butts et al., 1983)을 통해서 반영할 수 있지만, 잠실수중보에 대한 일관성 있는 재폭기 관련계수를 결정하기란 매우 어렵고 정확도도 떨어지기 때문에 본 연구에서 개발된 수리연계모듈을 이용하는 것이 보다 정확한 수리현상을 반영할 수 있을 것으로 판단된다. BOD에 대한 해석결과에서도 QUAL2E 모형의 구간별 수리특성계수를 이용하였을 때에는 약 23.5 km 지점에 위치한 탄천 유입으로 인한 BOD 증가가 과도하게 나타나고 있었지만, 수리연계모듈을 이용하였을 때에는 그 정도가 조금 낮게 적절한 양상으로 나타나고 있었다.

Fig. 8은 위의 4개 사상과 추가로 실시한 2003년 8월 사상에 대해 QUAL2E 모형의 구간별 수리특성계수를 이용한 모의결과를 기준으로 수리연계모듈을 적용한 모의결과와의 차이를 각 사상별 DO와 BOD 값의 변화량에 대해 도시하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 각 사상별로 잠실수중보 이전에서도 DO와 BOD 값의 차이가 발생하고 있었지만, 잠실수중보에서의 유속과 수심으로 인해 유량에 따른

사상별로 수질 농도의 많은 변화량이 발생하고 있으며, 이 지점에서의 영향이 하류단까지 계속되고 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 9는 5개 사상의 상류단인 팔당댐에서의 방류량과 잠실수중보에서의 DO와 BOD 변화량을 도시하였다. 팔당댐에서의 방류량이 적을수록 잠실수중보를 중심으로 한 상·하류 수위차는 크게 나타나게 되며, 이로 인해 재폭기 효과는 더욱 크게 나타날 것이다. 재폭기로 인한 DO의 농도가 높아짐에 따라 BOD의 농도는 상대적으로 떨어지게 된다. 반대로 팔당댐의 방류량이 많을수록 잠실수중보 상·하류 수위차는 없어지게 되며 결국 재폭기 효과는 나타나지 않게 되어, 이로 인한 BOD의 농도가 높아지는 수질반응을 그림에서 잘 나타내고 있었다.

4. 결론

하천에서의 수질해석을 위해 범용적으로 사용되는 QUAL2E 모형은 구간별 수리특성을 산정하는 과정에서 많은 불확실성과 비효율성을 내포하게 되며, 대상구간별로 동일한 수리특성을 가지도록 설정되어 있어 자연하도에서 발생하는 다양한 흐름변화나 국부적인 흐름상태를 자세히 반영하기 어려운 단점을 가지고 있다. 이와 같은 흐름특성의

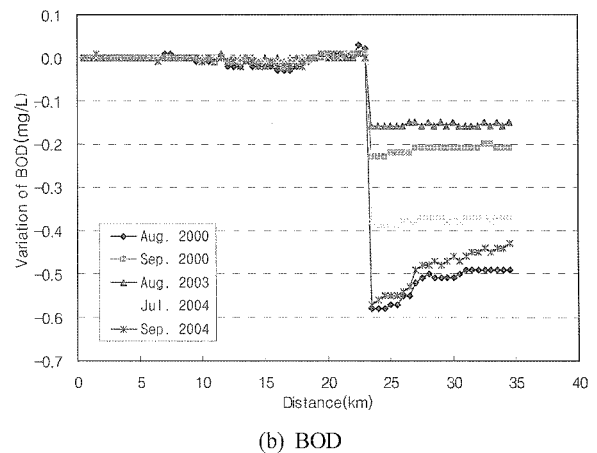
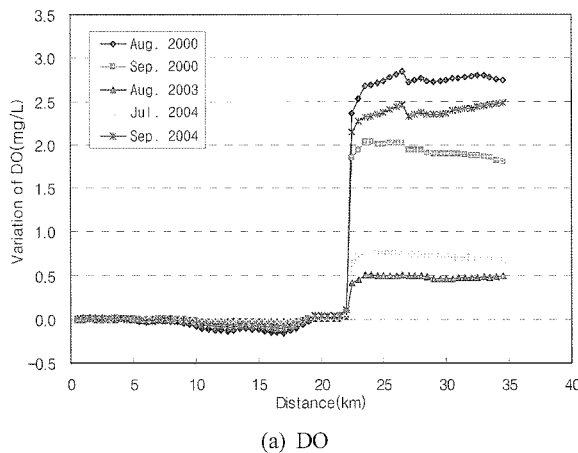


Fig. 8. Variation of simulation results.

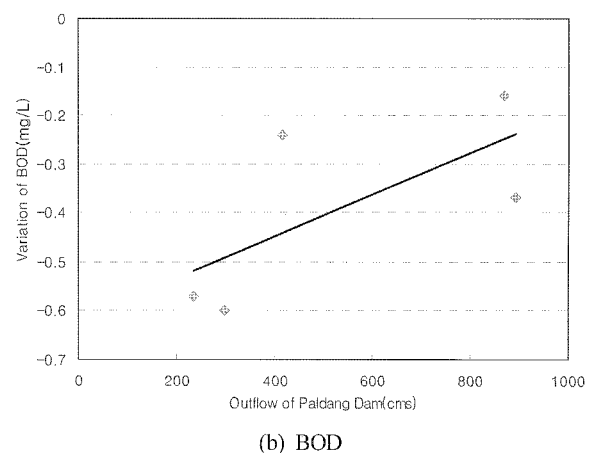
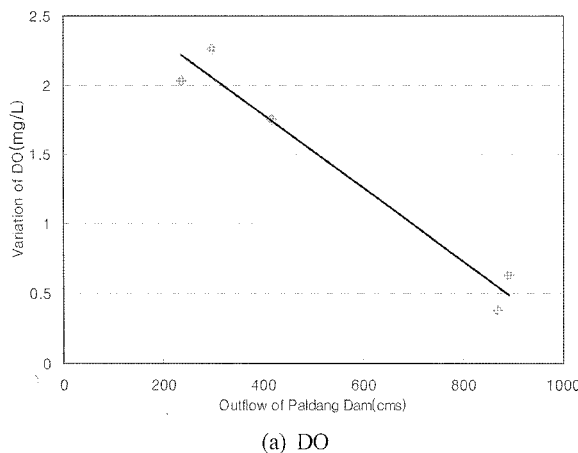


Fig. 9. Variation of DO and BOD at Jamsil submerged weir.

차이는 수질해석 모의결과의 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. 그 결과 잠실수증보와 같이 유속의 변화가 매우 빠르고 수심이 작은 곳에서 발생하는 재폭기 효과로 인한 수질변화가 기존 모형에서는 나타나지 않았지만, 수리연계모듈을 적용하였을 때는 그 효과가 비교적 잘 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 흐름의 변화가 매우 다양하게 나타나는 국내 하천에 대한 수질모의의 정확도 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(R08-2003-000-10923-0) 이기에 사의를 표합니다.

참고문헌

- 경민수, 김상단, 김형수, 박석근, 통계적 기법을 이용한 경안천 유역의 수질 측정망 구성, *대한토목학회논문집*, **26**(3B), pp. 291-300 (2006).
- 고익환, 노준우, 김영도, 정상 및 비정상상태 하천수질모형의 비교, *한국수자원학회논문집*, **38**(6), pp. 505-515 (2005).
- 김경섭, 윤동구, 이기영, 최소사승법에 의한 QUAL2E 모델 반응계수 보정, *한국수자원학회논문집*, **37**(9), pp. 719-727 (2004).
- 김상호, 김원, 한강 하류부 흐름해석을 위한 수리학적 모형의 구축, *한국수자원학회논문집*, **35**(5), pp. 485-500 (2002a).
- 김상호, 김원, 이을래, 최규현, 한강하류부 신곡수증보의 수리학적 영향분석, *한국수자원학회논문집*, **38**(5), pp. 401-413 (2005).
- 김용구, 하수정, 이한민, 박성천, 진화알고리즘을 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정, *2002년 한국수자원학회 학술발표회논문집*, pp. 461-466 (2002b).
- 박성천, 김용구, 노문수, 관측망 자료를 활용한 영산강 유역의 TMDL 결정에 관한 연구, *대한토목학회논문집*, **25**(6B), pp. 521-528 (2005).
- 백경원, 김상호, 한건연, 송재우, QUAL2E에 의한 한강 하류부에서의 수질해석, *대한토목학회논문집*, **15**(2), pp. 451-461 (1995).
- 오경두, 전병호, 이홍근, 백도현, 북한강 수역 수질관리를 위한 QUAL2E 모형의 적용, *대한토목학회논문집*, **16**(II-3), pp. 209-217 (1996).
- 전경수, 강주환, 하천 수질모형에 의한 비점 오염 부하량과 모형 매개변수의 동시 추정, *한국수자원학회논문집*, **37**(12), pp. 1009-1018 (2004).
- 조홍제, 한건연, 김상호, 낙동강 하류부에서의 오니준설에 따른 수질영향 분석, *한국수자원학회지*, **29**, pp. 177-186 (1996).
- 최연웅, 이근상, 김태근, 조기성, GIS 환경에서 QUAL2E를 이용한 하천 수질 모델링에 관한 연구, *대한토목학회 2000년도 학술발표회논문집(IV)*, pp. 777-780 (2000).
- 한건연, 송재우, 김상호, 백경원, 한강하류부에서의 총질소와 총인에 대한 수질모의, *한국수자원학회지*, **28**(4), pp. 137-146 (1995).
- 환경부, '05 수질오염사고 발생 실태 및 대책, <http://web2.me.go.kr> (accessed sep 2006).
- Brown, R. T. and Barnwell, T. O., Computer Program Documentation for the Enhanced Stream Water Quality Model QUAL2E and QUAL2E-UNCAS, *EPA/600-3-87/007*, US Environmental Protection Agency (1987).
- Butts, T. A. and Evans, R. L., Small Stream Channel Dam Aeration Characteristics, *J. of Env. Div., ASCE*, **109**(3), pp. 555-573 (1983).
- O'Connor, D. J., Oxygen Balance of an Estuary, *J. of Sanitary Engineering Division, ASCE*, **86**(SA3), pp. 35-55 (1960).
- O'Connor, D. J., and Di Toro, D. M., Photosynthesis and oxygen balance in streams, *J. of Sanitary Engineering Division, ASCE*, **96**(SA2), pp. 547-571 (1970).
- O'Connor, D. J. and Dobbins, W. E., Mechanism of reaeration in natural streams, *Trans., ASCE*, **123**, pp. 641-684 (1958).