

횡성호 수질모의를 위한 QUAL2E 모형의 적용

김상호[†]

상지대학교 이공과대학 건설시스템공학과

Application of QUAL2E Model for Water Quality Simulation of Hoengseong Lake

Sangho Kim[†]

Department of Civil Engineering, Sangji University

(Received 21 August 2008, Revised 28 July 2009, Accepted 12 August 2009)

Abstract

Detailed flow analysis in river is essential to increase the accuracy of water quality simulation since flow variation depends on many factors such as cross sections, channel slopes, and bed materials. In the QUAL2E stream water quality simulation model, the hydraulic coefficients are assigned to the reach that is collection of computational element using the hydraulic coefficient. This study developed a module that can incorporate the results of non-uniform flow analysis and assign such information to each individual element. Model application focused on the upstream of the Hoengseong reservoir including the reservoir where significant flow change is expected. Comparing with original QUAL2E model the developed module improved the result of water quality simulation without considering the relation of flow velocity and flow depth in terms of flow rates.

keywords : Hoengseong reservoir, Non-uniform flow, QUAL2E Model, Water quality simulation

1. 서론

먹는 물에 대한 사회의 관심이 높아짐에 따라 상수원수로서 주로 사용되는 호소수의 수질관리는 매우 중요시 되고 있다. 특히, 광역상수로 많이 사용되고 있는 댐 저류수와 댐으로 유입되는 하천수에 대한 수질관리는 수심이 깊고 유속이 매우 느린 호소의 수리학적 특성을 고려할 때 더욱 신중히 하여야 할 것이다.

하천에서의 수질관리는 1994년 낙동강에서 수질오염사고가 발생한 이후 상시 수질감시체제와 조기경보체제에 대한 필요성이 대두되면서부터 전국 주요 상수원을 비롯해 오염사고 취약지구에서 상시 수질을 감시하기 위한 자동측정망의 구축과 지류 또는 본류에서의 오염사고로 인한 하류부 하천수질 변화를 예측할 수 있는 수질관리모형의 구축으로 나누어 볼 수 있다. 수질해석을 위한 수질오염 대상인자는 단순한 유기물에 의한 생화학적 산소요구량, 수온과의 상관관계로 규명되는 용존산소뿐만 아니라 조류에 의한 산소의 변화량, 수중생물의 생산성, 부영양화와 관련하여 질소와 인의 변화, 위생학적 측면의 대장균군의 농도변화 등 다양하며, 그와 관련된 생물, 화학적 반응구조 및 반응상수 등이 복합적인 관계를 유지하고 있기 때문에 하천의 수질시스템은 매우 복잡하다고 할 수 있다. 이러한 복잡한 수질시스템의 재현과 예측을 위해서는 다양한 인자를 동시에

다룰 수 있는 수치모형에 의존하여야만 한다.

현재 하천에서의 수질모의를 위해 가장 광범위하게 사용되고 있는 모형은 QUAL2E 모형으로 Texas Water Development Board(1970)에 의해서 개발된 QUAL-I 모형에 기초하고 있으며, 이후 수년 동안 개선되면서 QUAL-II 모형 또는 QUAL2E 모형으로 발전하였고 최근에는 Windows 버전도 개발되어 널리 사용되고 있다(Brown and Barnwell, 1987; Roesner et al., 1981). 국내에서는 한국과학기술원(1982)과 한국건설기술연구원(1987, 1988)에서 QUAL-II 모형의 국내 유역에 대한 적용성을 검토한 이후, 많은 연구자들이 QUAL2E 모형을 이용하여 국내 하천에 대한 수질 해석을 실시하였다(김경섭 등, 2004; 김상호와 최현상, 2006; 백경원 등, 1995; 안태홍, 1988; 최홍식과 이길성, 1987; 한건연 등, 1994, 1995). 팔당호와 같은 호소를 포함하는 수계에 적용한 사례를 살펴보면 전경수와 이길성(1993)이 남한강과 북한강유역에 QUAL2E 모형의 영향계수 추정을 통해 하천 수질해석을 실시한 바 있으며, 오경두 등(1996)은 팔당댐 상류부터 북한강 수계에 대해 적용하였다. 김삼단 등(2004)과 박재로 등(2005a, 2005b)은 팔당호에 대한 수질영향분석을 수행하였으며, 김종민 등(2005)은 강우와 남한강 그리고 북한강과 같은 하천 유입수가 팔당호 수질에 미치는 영향을 분석하였다. 오경두 등(2000)은 횡성댐 건설이 댐 하류부의 수질에 미치는 영향을 분석하기 위해 QUAL2E 모형을 이용한 바 있으며, 정건희 등(2001)은 대청댐에서의 일수질 예측을 위해 신경망 모형을 이용한 바 있다. 정세웅 등(2007)과 정용락 등

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

(2008)은 대청호에 대한 수질 모의를 위해 2차원 모형을 이용하여 해석한 바 있다.

본 연구에서는 남한강 제1지류인 섬강 상류에 위치한 횡성댐 상류 호소구간과 하천구간인 계천에 대해 수질해석을 실시하고자 하였다. 특히 횡성호에서 나타나는 수리학적 흐름특성을 분석하고, 대상구간의 부등류 흐름특성을 수질모형에 적절히 반영할 수 있는 연계모형을 적용한 흐름특성별 수질계수들을 산정함으로써 보다 정확도 높은 수질해석을 수행하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. QUAL2E 모형의 개요

QUAL2E 모형은 하천에서의 1차원 수질해석을 위해 표준적으로 적용될 수 있는 수질모형으로서 13개 수질오염인자의 시뮬레이션이 가능하고 점오염원 및 비점오염원, 하천의 지류 및 용수취수 등을 다양하게 고려하여 모의할 수 있다. 대부분의 수질항목들은 정상상태로 모의가 되지만, 조류의 경우 유사 동적상태로 모의된다. 하천에서의 물질전달 거동은 1차원적 해석에 의하여 식 (1)과 같이 기술된다.

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

여기서, C : 단면평균의 오염물 농도 D : 종확산계수
U : 단면평균유속

식 (1)에서 좌측항은 어느 지점에서 시간에 대한 농도변화율을 나타내며, 우측항은 순서대로 종확산항, 이송항, 각 오염물질간의 생화학적 반응을 포함한 유출입항을 각각 표시하고 있으며, 정상상태인 경우에는 $\partial C/\partial t = 0$ 으로 표현된다.

하천의 수리조건은 정상 부등류로 해석하며 유량, 유속, 수심 등의 수리량들은 식 (2) 또는 식 (3)으로 계산된다.

$$U = aQ^b, \quad h = \alpha Q^\beta \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{n} A_x R^{2/3} S^{1/2} \quad (3)$$

여기서, a, b, α , β : 하천구간의 유량계수
h : 평균수심 U : 평균유속
Q : 유량 A_x : 통수단면적
R : 경심 S : 에너지경사
n : Manning의 조도계수

식 (2)의 a, b, α , β 는 상관관계에 의해 구하여야 하는 값들이고, 식 (3)은 사다리꼴 수로단면에 대하여 평균유속과 유량을 Manning 공식에 의한 Newton-Raphson 식에 의하여 계산되어야 한다.

2.2. 수리인자의 개선

QUAL2E 모형은 대상구간에 주어진 유량에 대한 유속 및 수심과 같은 수리인자를 결정하기 위해 유사한 수리특성을 가지는 구간(Reach)별로 식 (2)와 같은 멱함수 식을 이용하여 유속과 수심을 결정하게 된다. 이를 위해서는 식 (2)의 a, b, α , β 와 같은 수리특성 상수들을 구간별로 결정해야 하는데, 조흥계 등(1996)은 표준측차법에 의한 1차원 에너지방정식을 해석하는 HEC-2 모형을 이용하여 대상구간에 대한 수리학적 부등류 해석을 실시하여, 수심, 통수단면적, 유속, 경심 등의 자료를 구한 후 그 결과를 수리학적으로 유사한 특성을 가지는 것으로 판단되는 구간별로 회귀분석을 실시하여 수리학적 변수들을 구하였다. 전경수와 강주환(2004)은 소구간 내 횡단면의 가정된 수면표고에 대해 통수면적, 동수반경 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 방법은 구간별로 동일한 유속과 수심이 형성되는 것으로 가정하게 됨으로서 불규칙한 자연하도에서의 다양한 흐름변화를 반영할 수 없게 된다. 또한 유사한 흐름특성을 가진 구간을 세밀하게 나누더라도 단면별로 발생하는 유속과 수심의 차이로 인해 실제 발생하는 수리값과 회귀곡선과의 차이로 인한 오차는 불가피할 것이다. 이와 같은 흐름의 실제 특성과 QUAL2E 모형의 수리특성 계수를 사용함으로써 인해 발생하는 오차는 수질해석 결과의 차이를 유발하게 될 것이다.

따라서 본 연구에서는 QUAL2E 모형에 실제 자연하도의 단면변화로 인한 부등류 흐름특성을 반영하기 위해 1차원 부등류 해석모형으로 널리 사용되고 있는 DWOPER 모형과 HEC-RAS 모형의 모의결과를 QUAL2E 모형에 이용할 수 있는 연계모듈(김상호와 최현상, 2006)을 이용하여 수질해석을 실시하였다. 이러한 연계모듈이 적용된 QUAL2E 모형은 실제 대상구간에서 주어진 유량에 대해 발생가능한 지점별 유속과 수심 자료를 그대로 이용함으로써 보다 정확도 높은 수질해석을 수행하도록 한다.

2.3. 대상유역

본 연구를 수행하기 위한 대상유역인 횡성댐 상류의 횡성호는 남한강 제1지류인 섬강의 최상류부에 있는 지방2급 하천인 계천에 위치하고 있으며, 횡성호의 상류는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 계천(소군교)과 유동천(농거리교)이 합류하고 있다. 대상유역의 지형은 대체로 만장년기 지형으로서 주로 산지로 형성되어 있으며, 유역면적은 횡성댐 지점을 기준으로 209.0 km²이고 유로 연장은 37.0 km이다.

횡성호는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 하천형태를 띤 저수지로서 저류구간에서는 유속이 빠르지 않기 때문에 수질해석에 더욱 주의를 기울여야 한다. 대상구간에 대한 수질해석을 위해 계천의 상류인 소군교를 본류의 상류단으로, 유동천의 농거리교를 지류의 상류단으로 설정하였다. 대상구간의 하류단은 횡성댐으로 총 16.12 km로 구성하였다. 대

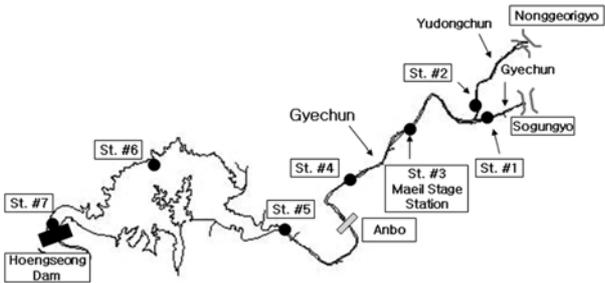


Fig. 1. Area map of Hoengseong Lake.

상구간에 대한 하상자료는 횡성댐 수리검토용역 보고서(횡성군, 2000)와 계천 하천정비기본계획 보고서(강원도, 2000)를 참고하였으며, 측량자료가 존재하지 않는 소군교와 농거리교에서부터 매일수위국 하류에 위치한 매일교 하류까지 약 4.3 km를 200 m 간격으로 2003년에 직접 측량을 실시하여 하도자료를 구축하였다. 대상구간에 대한 수질해석을 위해 부등류 해석을 통해 수리학적으로 유사한 경향을 가지는 것으로 판단되는 10개의 구간(Reach)으로 구분하였으며, 각 구간은 200 m 간격의 요소(element)로 구성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대상유역에 대한 수리해석

대상유역에 대한 수리해석을 실시하기 위해 본 연구에서는 동수역학적 흐름방정식을 4점 음해기법(four-point implicit method)에 의한 유한차분해석을 실시하여 그 해를 구하게 되는 1차원 범용 하천흐름해석 모형인 DWOPER 모형(Fread, 1987)을 이용하였다. 대상구간에 대한 수리해석모형의 적용을 위해 Table 1과 같이 2003년부터 2004년까지 발생한 4개 홍수사상에 대해 적용하였다. Fig. 2는 대상하천인 계천의 최심하상고를 나타내고 있으며, Fig. 3은 대상하도의 변화양상을 부등류 해석모형인 HEC-RAS 모형을 이용하여 나타내고 있다. 그림에서 나타났듯이 대상구간의 하상경사는 매우 급격한 양상을 나타내고 있으며, 하류로 내려올수록 하폭의 변화도 매우 심하게 나타나고 있었다.

Table 1에 제시된 4개 홍수사상에 대해 수리학적 홍수추적 모형인 DWOPER 모형의 보정을 실시하였다. Fig. 4는 각 사상별로 매일수위국에서의 모의결과와 실제 측정된 수위자료를 비교한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 2004년도 사상에서 침수홍수위가 약간 높게 나타

Table 1. Flood events of Kyeochun watershed

| Flood event | Maeil stage station | | Simulation time (hr) |
|---------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| | Max. stage (m) | Max. discharge (cms) | |
| Jul. 22, 2003 | 188.50 | 243.80 | 37 |
| Aug.27, 2003 | 188.83 | 342.35 | 23 |
| Sep. 7, 2003 | 188.80 | 332.32 | 26 |
| Jul. 12, 2004 | 189.45 | 582.45 | 54 |

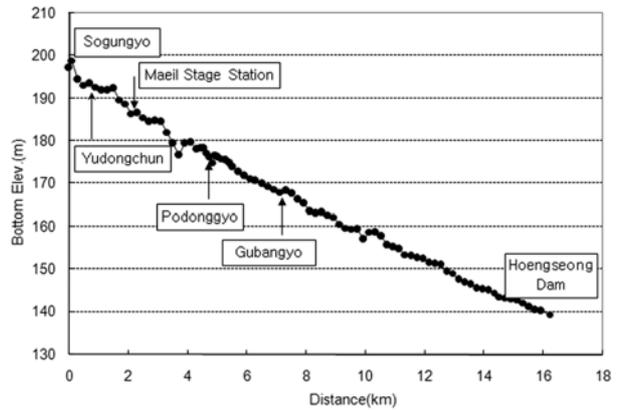


Fig. 2. Thalweg variation of study area.

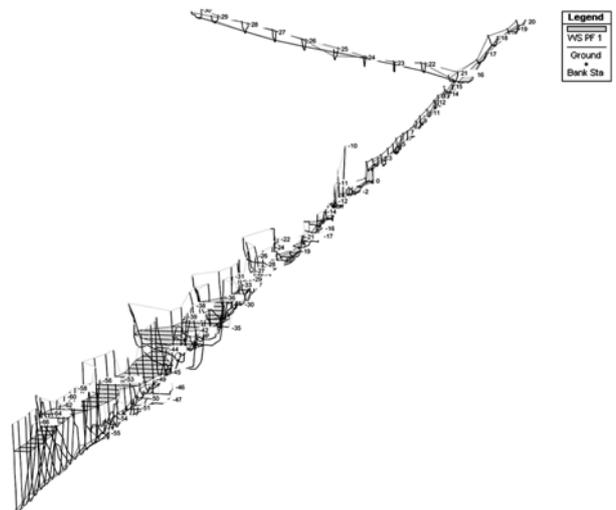


Fig. 3. Cross-sectional area variation of study area.

나고 있었지만 전체적으로 홍수위의 변화양상을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

3.2. 대상유역에 대한 수질해석

3.2.1. 모형의 보정

대상구간의 상류단인 소군교에서부터 횡성댐 직상류까지 총 16.2 km 구간에 대해 QUAL2E 모형을 구축하였다. 모형에 대한 보정과 검증을 위해 Table 2에서 보는 바와 같이 2003년에는 4개 사상을, 2004년에는 3개 사상을 선정하였다. 대상구간에 대한 유량계수의 산정을 위해 2003년과 2004년에 발생한 유량규모별로 부등류 해석을 실시하고, 하도내 각 지점에서의 수심, 통수단면적, 유속, 경심 등의 자료를 이용하여 적정 범위에 대한 회귀분석을 통하여 유량계수 a , b , α , β 를 산정하였다. 각 구간별로 산정된 유량계수는 Table 3과 같다. 표에서 보는 바와 같이 횡성댐의 저수위를 기준으로 산정된 유량계수는 구간 8에서부터 횡성댐의 배수위 영향을 받아 흐름의 유속이 급격히 느려지는 것을 확인할 수 있다.

QUAL2E 모형의 여러 가지 수질항목들 가운데 가장 중요항목으로 다루어지고 있는 DO와 BOD에 미치는 매개변

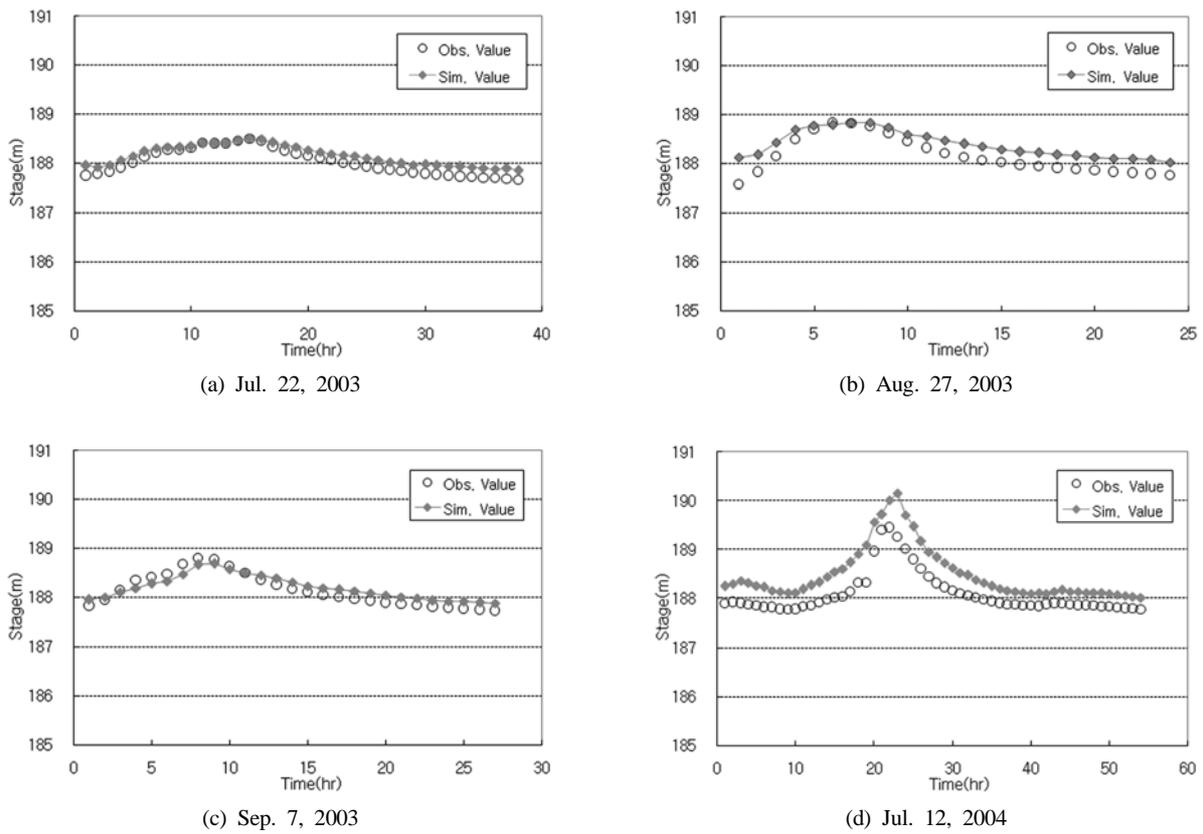


Fig. 4. Stage comparison of simulation results.

Table 2. Events for water quality simulation

| Event | Maeil stage station | | | | | Ref. |
|--------------|---------------------|-----------|------------|-----------|------------|--------------|
| | Discharge (cms) | Stage (m) | Temp. (°C) | DO (mg/L) | BOD (mg/L) | |
| Sep. 5, 2003 | 36.35 | 1.09 | 18.7 | 9.40 | 1.0 | Calibration |
| Nov. 7, 2003 | 0.97 | 0.65 | 10.6 | 10.80 | 1.4 | |
| Sep. 2, 2003 | 56.14 | 1.15 | 18.4 | 9.38 | 0.6 | Verification |
| Dec.16, 2003 | 1.21 | 0.57 | 1.6 | 9.78 | 0.7 | |
| Jul, 7, 2004 | 32.63 | 0.98 | 18.6 | 7.23 | 1.1 | |
| Sep.23, 2004 | 9.91 | 0.9 | 19.9 | 7.18 | 0.3 | |
| Oct.23, 2004 | 3.02 | 0.77 | 13.7 | 11.89 | 1.2 | |

Table 3. Discharge coefficients for research area

| Reach number | a | b | α | β |
|--------------|---------|--------|----------|---------|
| 1 | 0.5568 | 0.2598 | 0.3319 | 0.4538 |
| 2 | 1.2615 | 0.1889 | 0.1784 | 0.4955 |
| 3 | 0.1532 | 0.5207 | 0.9314 | 0.3058 |
| 4 | 0.6167 | 0.2532 | 0.1782 | 0.5153 |
| 5 | 0.3613 | 0.3506 | 0.2652 | 0.4138 |
| 6 | 0.1981 | 0.4048 | 0.2805 | 0.3739 |
| 7 | 0.3518 | 0.3042 | 0.186 | 0.4348 |
| 8 | 0.0019 | 0.9777 | 4.6836 | 0.0474 |
| 9 | 0.00001 | 1.4792 | 15.646 | 0.0001 |
| 10 | 0.00002 | 1.4467 | 24.946 | 0.00003 |

Table 4. Reaction coefficients for research area

| Reach number | K_1 | K_3 | K_4 |
|--------------|-------|--------|-------|
| 1 | 0.570 | -0.100 | 3.200 |
| 2 | 0.338 | 0.330 | 1.091 |
| 3 | 0.338 | 0.330 | 1.091 |
| 4 | 0.215 | -0.270 | 2.045 |
| 5 | 0.107 | -0.119 | 1.958 |
| 6 | 0.155 | -0.180 | 0.715 |
| 7 | 0.080 | -0.100 | 0.415 |
| 8 | 0.040 | -0.040 | 0.415 |
| 9 | 0.040 | -0.040 | 0.315 |
| 10 | 0.040 | -0.040 | 0.315 |

수질에 대한 최적화를 실시하였다. 최적화 과정은 Broyden, Fletcher, Goldfarb 및 Shanno 등이 개발한 최적화 알고리즘인 BFGS 기법(조흥제 등, 1996)을 이용하여 DO와 BOD

에 주로 영향을 미치는 K_1 , K_3 , K_4 에 대한 최적반응계수를 Table 4와 같이 도출하였다. 여기서 K_1 은 탈산소계수[T^{-1}]를 의미하여, K_3 은 침전으로 인한 BOD의 손실률, K_4 에는 하

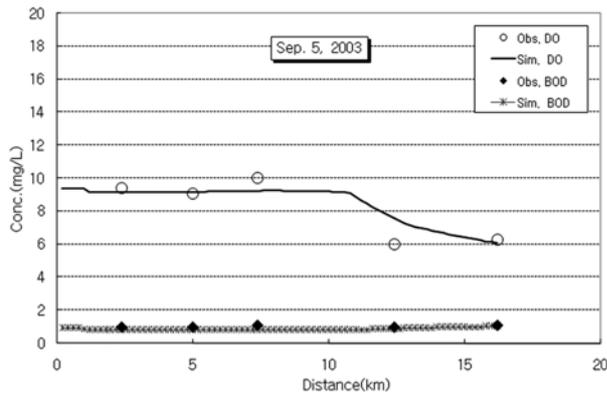


Fig. 5. Simulation result for Sep. 5, 2003.

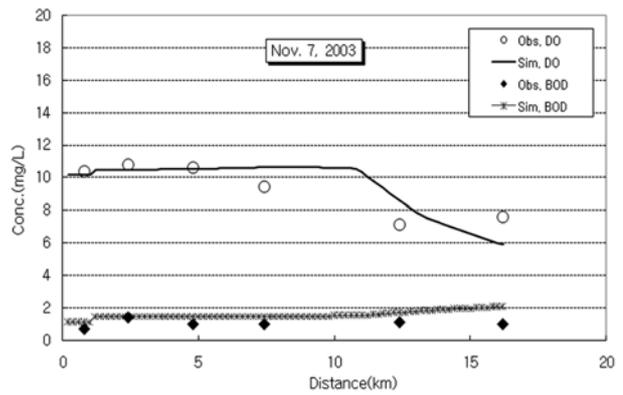


Fig. 6. Simulation result for Nov. 7, 2003.

상산소요구량[$ML^{-2}T^{-1}$]을 의미한다.

Fig. 5~6은 유량계수들을 이용하여 모의된 DO와 BOD에 대한 모형의 보정결과를 나타내고 있다. DO의 모의결과를 살펴보면 전반적으로 실측자료와 잘 일치하고 있지만, 형성호의 배수영향으로 하천의 유속이 급격히 낮아지기 시작하는 구간에서부터 DO의 농도가 급격히 떨어지는 것으로 나타났다. 하지만 BOD의 모의결과는 농도의 큰 변화없이 측정자료와 잘 일치하고 있었다. 대상구간에 대한 모의결과에서 형성호로 인해 하천 흐름이 급속히 느려지는 구간에서는 DO의 농도가 급격히 낮아지고 BOD의 농도는 조금씩 상승하는 경향을 나타내고 있었는데, 이와 같이 흐름의 유속이 급격히 느려지는 구간에 대한 보다 정확한 수질모형을 위해서는 흐름속성과 관련된 모형의 체계적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

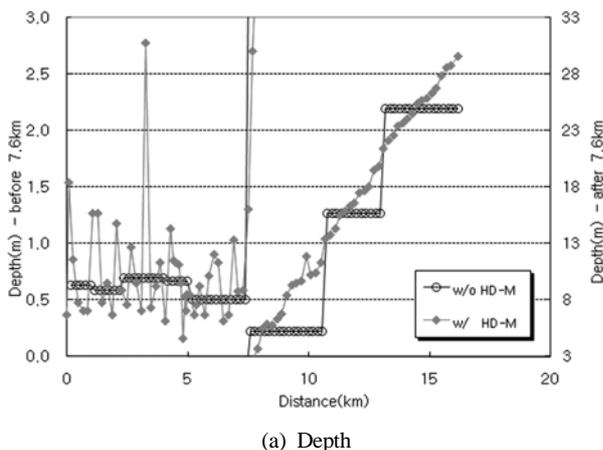
3.2.2. 모형의 수리인자 특성분석

QUAL2E 모형에서 하천의 흐름특성을 반영하기 위해서는 앞서 기술한 바와 같이 유량계수 a, b, α, β 를 이용하게 되는데, 이와 같은 유량계수 형태의 수리인자들(w/o HD-M)과 대상구간에 대한 부등류 해석을 수행하였을 때 각 지점별 수리인자들(w/ HD-M)을 비교하였다.

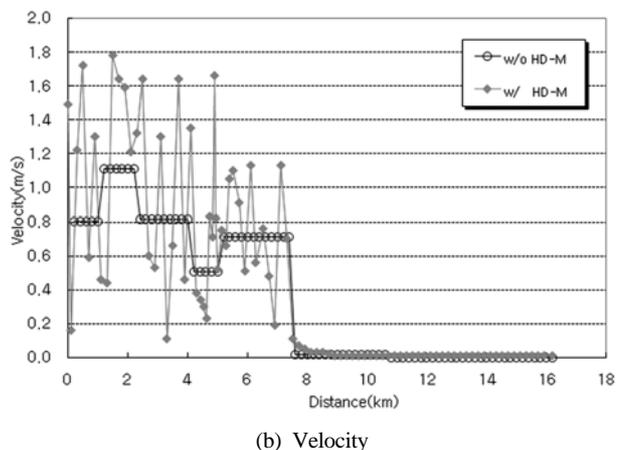
Fig. 7~8은 매일수위국의 유량이 9.91 cms로 관측된 비

교적 작은 유량이 흐를 때의 적용결과이다. Fig. 7(a)는 QUAL2E 모형에 사용되는 수심에 대한 적용결과를 나타내고 있다. 실제 단면의 변화로 인한 대상구간의 수심변화는 부등류 해석을 수행하였을 때 각 단면마다 변화양상이 매우 심하게 나타나고 있었지만, QUAL2E 모형을 이용하였을 때에는 각 구간마다 평균된 수리인자들의 값을 사용하게 된다. Fig. 7(b)는 유속에 대한 결과를 나타내고 있는데, 상류단에서 7.6 km 지점부터는 배수위의 영향으로 유속이 0.1 m/s 이하로 매우 느리게 흐르고 있었다. 특히 상류단에서 3.6 km 지점에서 수질모형의 유량계수를 사용하였을 때의 유속은 약 0.813 m/s로 나타났지만, 부등류 해석을 실시하였을 때에는 3.3 km 지점에서는 0.11 m/s가 나타났으며, 3.7 km 지점에서는 1.64 m/s로 나타나 각 지점마다 흐름의 특성이 매우 다르게 나타나고 있었다. 이와 같은 수심과 유속의 지점별 차이는 Fig. 8과 같은 확산계수의 차이를 유발하게 된다. 그림에서 보는 바와 같이 각 지점별로 모형에서 사용되는 계수의 차이는 평균 개념에서 보았을 때 수질모형의 모의결과와 크게 차이나지 않을 수도 있지만, Fig. 8의 저수지 구간에서는 이송확산계수값의 차이가 비교적 크게 나타나고 있었다.

결국 지점별로 다양한 흐름이 발생하는 실제 자연하천에서의 흐름은 구간별 유량계수를 사용함으로써 평균개념으



(a) Depth



(b) Velocity

Fig. 7. Analysis of hydraulic coefficients for Sep. 23, 2004.

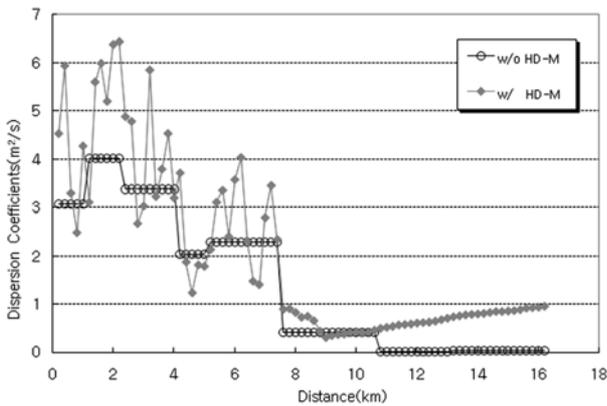


Fig. 8. Analysis of dispersion coefficients for Sep. 23, 2004.

로 적용되게 되며, 이로 인해 수중보와 같은 수공구조물에서의 흐름이나 저수지처럼 흐름이 매우 느린 곳에서의 정확한 재현은 매우 어렵게 될 것이다.

3.2.3. 부등류 해석결과를 이용한 수질모의

대상구간에 대한 보정결과인 Fig. 5~6에서도 나타나듯이 유량계수를 사용하였을 때의 수심, 유속과 같은 수리학적 인자들의 값들로 인해 횡성호의 배수범위에서는 DO의 농도가 급격히 떨어지는 현상이 발생하고 있어 실제 대상지역에서의 수질변화에 대한 모호성이 나타나고 있다.

이에 본 연구에서는 수리연계모형을 이용하였을 때의 모의결과를 비교하고자 하였으며, 이와 함께 저수지 구간에 대한 DO와 BOD의 반응계수인 K_1, K_3, K_4 의 기존 사용값으로 인해 급격한 농도변화가 발생할 수 있기 때문에 Table 5와 같은 새로운 반응계수 값을 사용하였다. 표에서는 저수지 구간에서 반응계수의 값이 급격히 변화하는 기존의 값과는 달리 하천의 반응계수로부터 조금 변화하는 정도의 값을 사용하였다. 따라서 본 절에서는 반응계수 K_1, K_3, K_4 의 두 가지 모의조건과 더불어 기존 QUAL2E 모형의 유량계수를 사용하는 경우와 수리연계모형을 이용하여 부등류 해석결과를 수질모형에 이용하는 두 가지 모의조건을 서로 조합한 4가지 모의조건을 이용하여 모의하였으며, Table 6에 이들 4가지 모의조건을 나타내었다.

Fig. 9는 Table 6의 4가지 모의조건을 이용하여 7개 사상에 대한 모의결과 가운데 수온에 대한 결과를 나타내고 있

다. 그림에서 보는 바와 같이 4가지 모의조건에서 수질반응계수 K_1, K_3, K_4 의 변화에 따른 수온의 변화는 거의 없는 것으로 나타나고 있으며, 다만 수리반응계수 a, b, α, β 를 사용하였을 때와 부등류 해석결과를 사용하였을 때만 차이가 나타나고 있었다. 이러한 차이는 횡성호의 배수위 영향을 받는 구간에서 수심과 유속에 따라 수온의 모의결과가 다르게 나타나는 것을 의미하는데, 그림에서 QUAL2E 모형의 유량계수 a, b, α, β 를 사용하였을 때는 하절기와 동절기에 따라 수온의 상승 또는 하강 범위가 지나치게 발생하고 있었다. 하지만 부등류 해석결과를 이용한 수질모의 결과에서는 저수지 범위에서의 수온변화가 비교적 완만하게 변화하고 있어 보다 적절한 모의결과를 나타내고 있으며, 7개 사상의 모의결과를 실측 수온과 비교해 볼 경우에도 부등류 해석결과를 이용하였을 때가 보다 잘 맞게 나타나고 있었다.

Fig. 10은 DO에 대한 모의결과를 나타내고 있는데, 4가지 모의조건에 따라 결과가 모두 다르게 나타나고 있었다. 먼저 수질모형의 보정에 사용되었던 조건인 유량계수 a, b, α, β 를 사용하고 기존의 수질반응계수를 사용하였을 경우(w/o HD-CF1) 7개 사상의 모의결과를 살펴보면 전반적으로 저수지 범위에서의 DO 농도 저하가 급격하게 발생하고 있었다. 특히 2004년 7월에는 관측된 DO 농도보다 모의된 결과가 현저히 낮게 발생하고 있었으며, 2004년 9월에는 저수지 끝단부인 횡성댐 부근에서 DO의 농도가 '0'으로 모의되고 있어 기존 유량계수를 사용하였을 경우 저수지에서의 수질모의에는 적합하지 않는 것으로 판단되었다.

결국 기존의 유량계수 a, b, α, β 를 사용하였을 경우 저수지 범위에서 발생하는 DO 농도의 급격한 저하는 부등류 해석결과를 사용하였을 때는 발생하지 않게 되며, 수질반응계수의 값에 따라 좀 더 정확한 모의결과를 도출할 수 있는 것으로 나타났다.

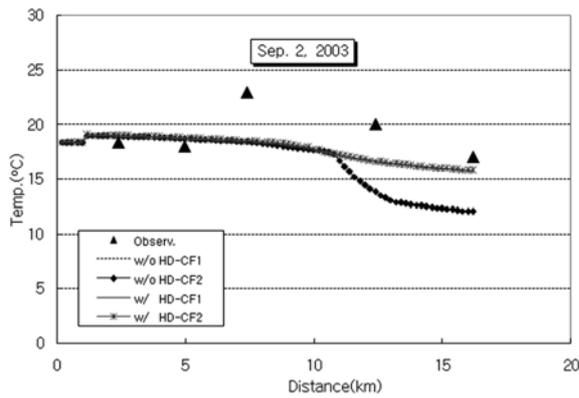
Fig. 11은 BOD에 대한 모의결과를 나타내고 있는데, 기존의 유량계수 a, b, α, β 를 사용하고 새로운 수질반응계수를 사용한 경우(w/o HD-CF2)에는 저수지 범위에서 BOD 농도가 급격히 상승하는 적절치 못한 모의결과를 얻을 수 있었으며, 이 경우를 제외한 나머지 세 경우에는 저수지 범위에서 약간의 차이는 있지만 유사한 결과를 제시하는 것으로 나타났다. 이 가운데 부등류 해석결과를 이용

Table 5. Reaction coefficients for results

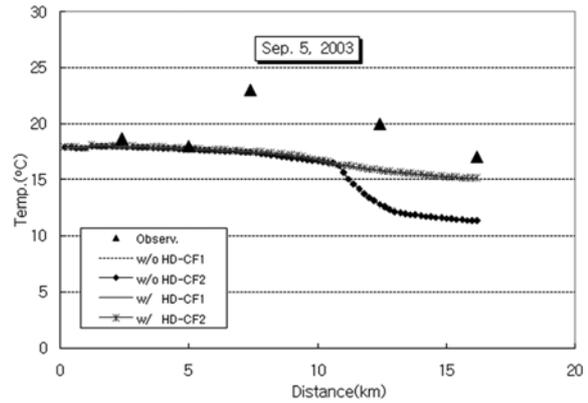
| Reach No. | k_1 | k_3 | k_4 |
|-----------|-------|--------|-------|
| 1 | 0.570 | -0.100 | 3.200 |
| 2 | 0.338 | 0.330 | 1.091 |
| 3 | 0.338 | 0.330 | 1.091 |
| 4 | 0.215 | -0.270 | 2.045 |
| 5 | 0.107 | -0.119 | 1.958 |
| 6 | 0.155 | -0.180 | 0.715 |
| 7 | 0.155 | -0.180 | 0.415 |
| 8 | 0.155 | -0.180 | 0.415 |
| 9 | 0.155 | -0.180 | 0.315 |
| 10 | 0.155 | -0.180 | 0.315 |

Table 6. Simulation conditions for study area of nonuniform flow analysis

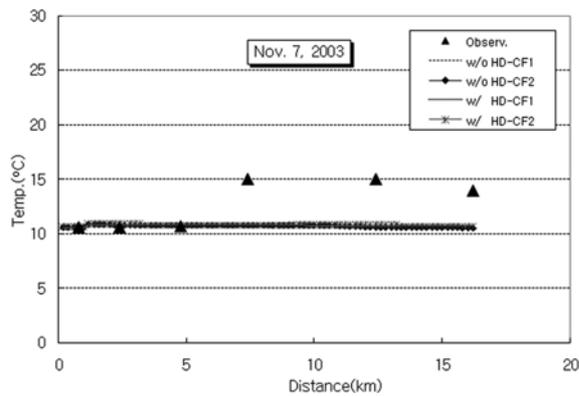
| No. | Water-Quality reaction coefficient (k_1, k_3, k_4) | Hydraulic reaction coefficient | Reference |
|-----|--|------------------------------------|------------|
| 1 | Orig. Coeff. (Table 4) | a, b, α, β | w/o HD-CF1 |
| 2 | New Coeff. (Table 5) | a, b, α, β | w/o HD-CF2 |
| 3 | Orig. Coeff. (Table 4) | Result of nonuniform flow analysis | w/ HD-CF1 |
| 4 | New Coeff. (Table 5) | Result of nonuniform flow analysis | w/ HD-CF2 |



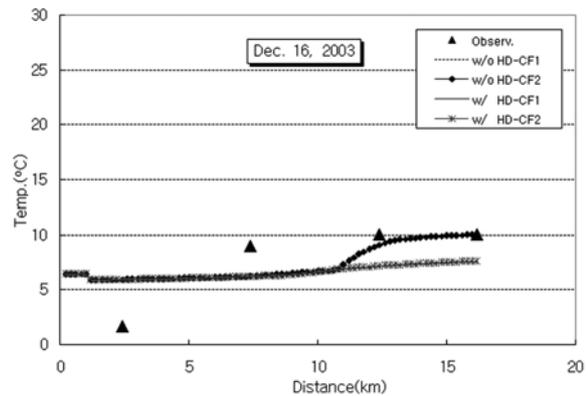
(a) Sep. 2, 2003



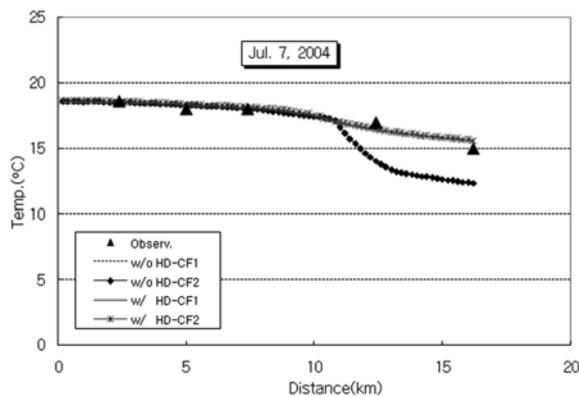
(b) Sep. 5, 2003



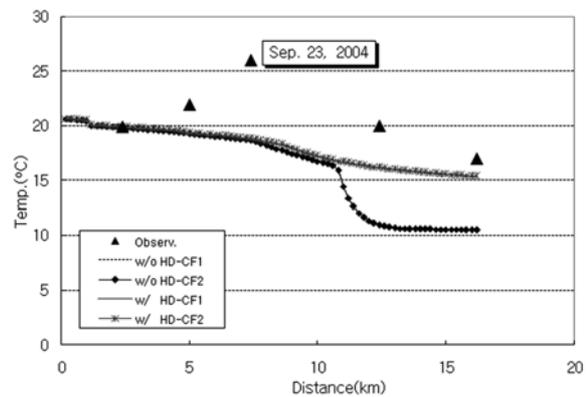
(c) Nov. 7, 2003



(d) Dec. 16, 2003



(e) Jul. 7, 2004



(f) Sep. 23, 2004

Fig. 9. Simulation results for temperature.

하고 새로운 수질반응계수를 사용한 경우(w/HD-CF2)가 저수지 범위에서 측정된 BOD 농도와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

결국 하천의 유속이 매우 느린 경우 기존의 유량계수 a , b , α , β 를 사용할 때 적절하지 못한 모의결과를 얻을 수 있으며, 부동류 해석결과를 이용할 경우 적절한 모의결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 횡성호와 같이 저수지가 있을 경우 보다 풍부하고 정확한 수질 측정자료를 토대로 모형에 대한 적절한 반응계수의 산정이 가능할 것이다.

4. 결론

상수원수로서 수질보존가치가 높은 횡성호에 대한 수질해석을 실시하기 위해 QUAL2E 모형을 이용하였다. QUAL2E 모형은 대상하도를 수리학적으로 유사한 흐름특성을 가지는 구간으로 나누고, 구간별로 유량계수를 지정하기 때문에 각 구간에서는 동일한 수리학적 특성을 가지게 된다.

이는 자연하도에서 발생하는 다양한 흐름변화나 수증보로 인한 유속증가와 같은 국부적인 흐름상태를 정확하게 반영하는 것이 어려워진다. 이와 같이 실제 흐름특성과 모

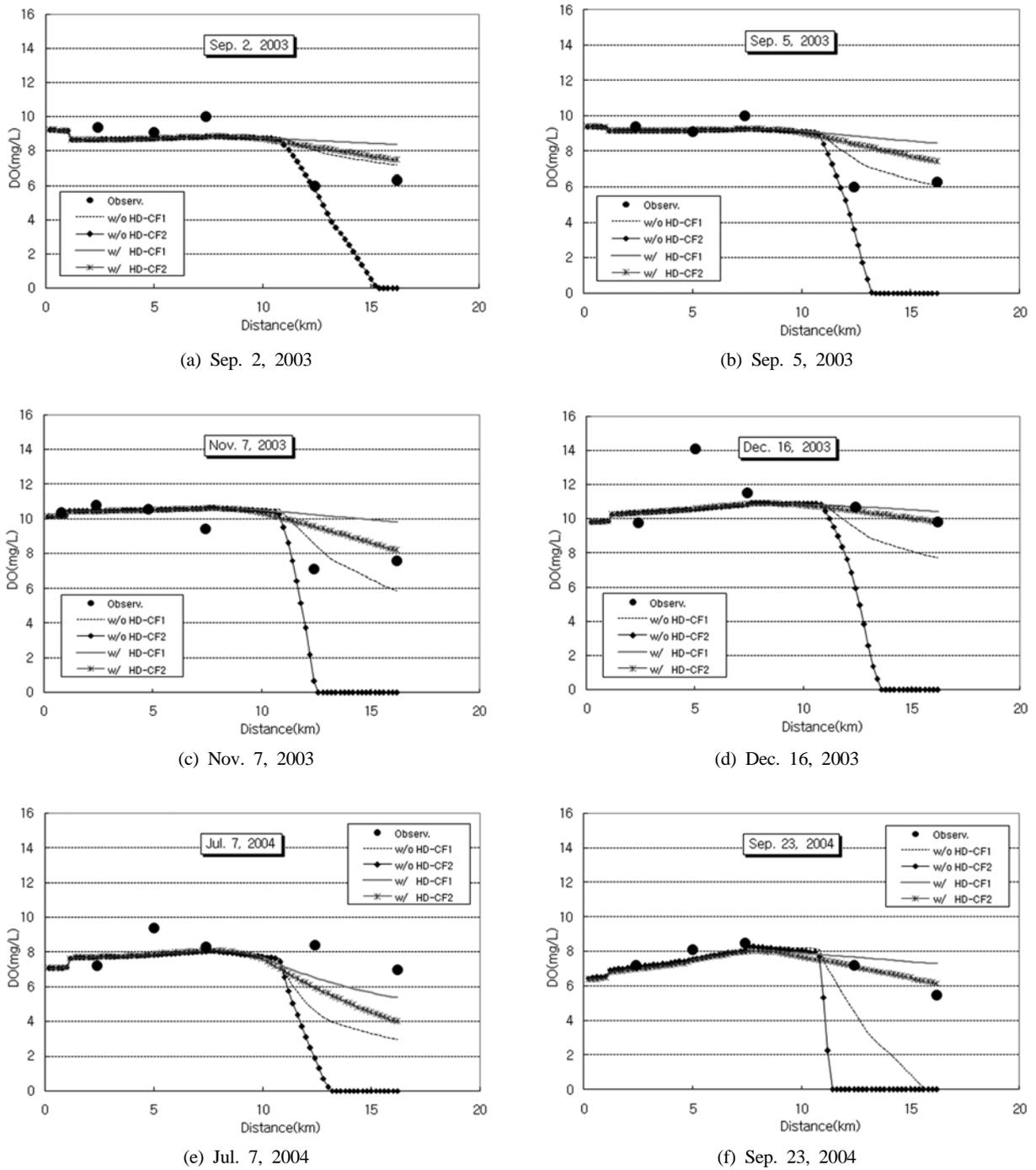
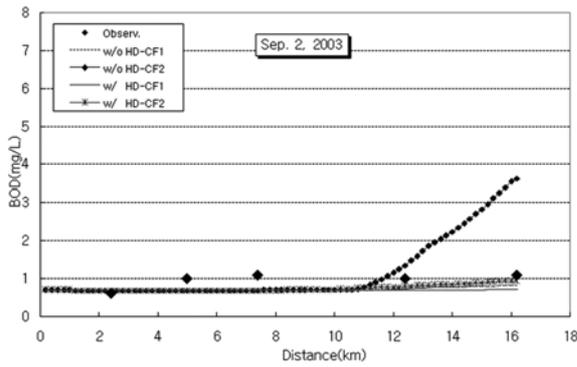


Fig. 10. Simulation results for DO.

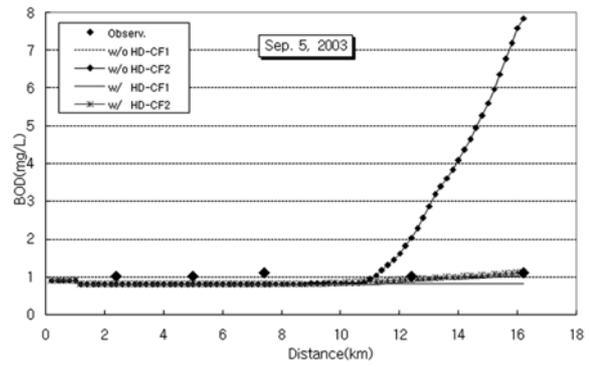
형에서 모의되는 흐름특성과의 차이는 수질해석특성과의 차이로 나타나기 때문에 정확도 높은 수질해석을 위해서는 무엇보다 모형에 대해 정확한 수리특성의 반영이 필요하다.

본 연구대상 구간인 횡성댐 상류 계천구간은 횡성호를 포함하고 있으며, 저수지 구간에서는 특히 유속이 느려지는 수리특성을 가지고 있어 보다 정확한 흐름결과를 QUAL2E 모형에 반영할 필요가 있는 구간이다. 이를 위해 1차원 범용 수리해석모형인 DWOPER 모형이나 HEC-RAS 모형의 모의결과에서 수리인자들을 이용할 수 있도록 개발된 연계 모듈을 이용하여 수질해석을 수행하였다. 모의결과에 대한

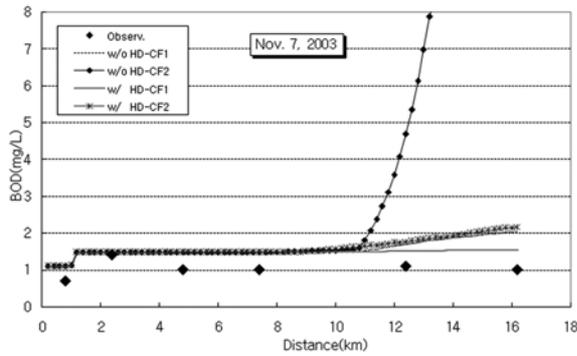
비교분석을 위해 흐름특성을 유량계수를 이용하는 경우와 부등류해석 결과를 이용하는 경우 그리고 주요 매개변수들에 대한 값을 기존 모형보정과정을 통해 산정된 계수값과 부등류해석 결과를 이용하는 경우에 대해 적용된 새로운 계수값을 사용한 결과를 비교하였다. 그 결과 횡성호와 같이 유속이 매우 느린 구간에 대한 수질모의를 위해서는 부등류 해석을 통해 얻은 수리인자들을 이용하고 그에 적합한 수질계수들을 산정함으로써 보다 정확도 높은 수질해석이 가능함을 확인할 수 있었다.



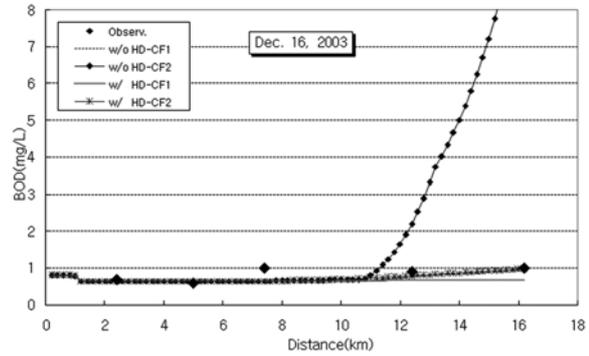
(a) Sep. 2, 2003



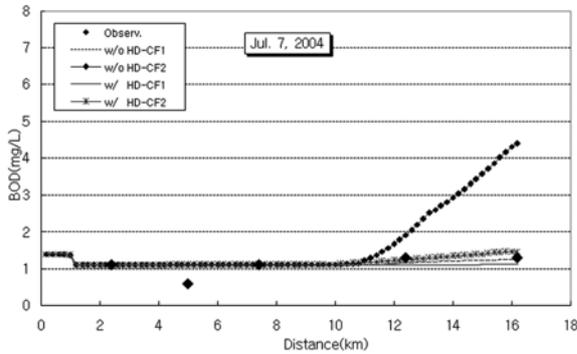
(b) Sep. 5, 2003



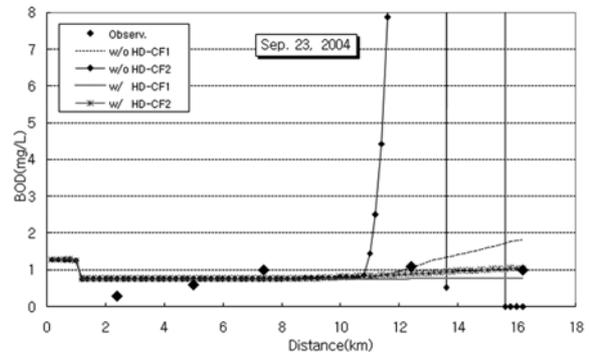
(c) Nov. 7, 2003



(d) Dec. 16, 2003



(e) Jul. 7, 2004



(f) Sep. 23, 2004

Fig. 11. Simulation results for BOD.

사 사

이 논문은 2008년도 상지대학교 교내 연구비 지원에 의한 것이며, 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

강원도(2000). *계천하천정비기본계획*.
 김경섭, 윤동구, 이기영(2004). 최소자승법에 의한 QUAL2E 모델 반응계수 보정. *한국수자원학회논문집*, **37**(9), pp. 719-727.
 김상단, 송미영, 이기영, 이성룡(2004). 단순회귀모형을 이용한 인구와 도시적 토지이용이 팔당호 수질에 미치는 영

향 분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **20**(6), pp. 703-707.
 김상호, 최현상(2006). 부등류해석을 이용한 QUAL2E 모형의 개선. *수질보전 한국물환경학회지*, **22**(6), pp. 1144-1150.
 김종민, 노혜란, 허성남, 양희정, 박준대(2005). 강우 및 유입 하천수가 팔당호 수질에 미치는 영향분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **21**(3), pp. 277-283.
 박재로, 권혁, 이효범(2005a). 물질수지 분석을 통한 팔당호 상류 지천별 영향성 평가 - 남한강, 경안천을 중심으로. *2005년도 정기 학술대회 논문집*, 대한토목학회, pp. 396-399.
 박재로, 권혁, 이효범(2005b). 물질수지 분석을 통한 팔당호 상류 지천별 영향성 평가 - 북한강을 중심으로. *2005년도 정기 학술대회 논문집*, 대한토목학회, pp. 2770-2773.
 백경원, 김상호, 한건연, 송재우(1995). QUAL2E에 의한 한강 하류부에서의 수질해석. *대한토목학회논문집*, **15**(2), pp. 451-461.

- 안태홍(1988). QUAL2E 모형을 이용한 한강본류 수질의 예측평가에 관한 연구. 석사학위논문, 서울대학교 환경대학원.
- 오경두, 전병호, 이준학, 정관수(2000). 횡성댐 건설이 댐하류부 환경에 미치는 영향 검토. 2000년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 573-576.
- 오경두, 전병호, 이흥근, 백도현(1996). 북한강 수역 수질관리를 위한 QUAL2E 모형의 적용. 대한토목학회논문집, 16(II-3), pp. 209-217.
- 전경수, 강주환(2004). 하천 수질모형에 의한 비점 오염 부하량과 모형 매개변수의 동시 추정. 한국수자원학회논문집, 37(12), pp. 1009-1018.
- 전경수, 이길성(1993). 영향계수를 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정. 대한토목학회논문집, 13(4), pp. 163-176.
- 정건희, 김중훈, 신현석, 김진관(2001). 신경망 모형을 이용한 대청댐의 수질예측 모형의 구성 I. 일수질예측모형. 2001년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 1-4.
- 정세웅, 박재호, 김유경, 윤성완(2007). 대청호 부영양화 모의를 위한 CE-QUAL-W2 모델의 적용. 수질보전 한국물환경학회지, 23(1), pp. 52-63.
- 정용락, 정세웅, 류인구, 최정규(2008). 대청호와 하류하천 연속시스템의 2차원 수리·수질 모의. 수질보전 한국물환경학회지, 24(5), pp. 581-591.
- 조홍재, 한건연, 김상호(1996). 낙동강 하류부에서의 오니준설에 따른 수질영향 분석. 한국수자원학회지, 29, pp. 177-186.
- 최홍식, 이길성(1987). QUALII 모형의 금강수계에의 적용. 상하수도학회지, 1(2), pp. 20-33.
- 한건연, 김상현, 박재홍(1995). 하천수질 변동의 예측을 위한 추계학적 수질해석 모형의 개발. 한국수자원학회 논문집, 28(2), pp. 103-113.
- 한건연, 이정식, 김상현, 김홍태(1994). 낙동강 중류부에서의 확정론적 수질해석. 한국수문학회 논문집, 27(1), pp. 53-67.
- 한국과학기술원(1982). 대기, 수질 환경관리 전산모델 연구.
- 한국건설기술연구원(1987). PC용 하천수질관리 모델의 개발(2).
- 한국건설기술연구원(1988). PC용 수질계측모델의 개량 및 응용.
- 황성균(2000). 횡성댐 수리검토용역.
- Brown, R. T. and Barnwell, T. O. (1987). *Computer Program Documentation for the Enhanced Stream Water Quality Model QUAL2E and QUAL2E-UNCAS*. EPA/600-3-87/007, US Environmental Protection Agency.
- Fread, D. L. (1987). National Weather Service Operational Dynamic Wave Model, *National Weather Service*, Silver Springs, MD.
- Roesner, L. A., Giguere, P. R., and Evenson, D. E. (1981). *Computer Program Documentation for the Stream Quality Model QUAL-II*. EPA 600/9-81-014, Water Resources Engineers, Inc., Walnut Creek, CA.
- Texas Water Development Board (1970). *Simulation of Water Quality in Streams and Canals, Program Documentation and User's Manual*, Austin, TX.