

횡성댐 상류유역에 대한 수질관리모형의 적용

김상호[†] · 이올래^{*}

상지대학교 이공과대학 건설시스템공학과
^{*}한국수자원공사 수자원연구원 물정보화연구소

Application of Water-Quality Management Model for Upstream Basin of Hoengsung Dam

Sang Ho Kim[†] · Eul Rae Lee^{*}

Department of Civil Engineering, Sangji University
^{*}Hydroinformatics Research Center, KIWE, Kwater
(Received 23 January 2008, Accepted 14 March 2008)

Abstract

In this study, an optimized deterministic water-quality model was constructed to estimate water quality of a river and lake in the upstream basin of a dam. A stochastic water-quality analysis using reliability analysis technique was applied to the model. The model was tested in the 13.9 km reach from Maeil stage station of Kyecheon to Hoengsung Dam of Sum River. After finding hydraulic characteristics from nonuniform flow analysis, Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) optimization technique for model calibration was applied to determine optimum reaction parameters, and model verification was performed based on these. The stochastic model, using Mean First-Order Second-Moment (MFOSM) and Monte-Carlo methods, was applied to the same reach as the deterministic study. Variations of discharge and water quality in headwater were considered, as well as variations of hydraulic coefficients and reaction coefficients. The statistical results of output variables from MFOSM were similar to those from the Monte-Carlo method. Risk analysis using MFOSM and Monte-Carlo methods presented the probabilities of some locations in the Hoengsung Lake violating existing water-quality standards in terms of DO and BOD.

keywords : Hoengsung Dam, QUAL2E model, Reliability analysis, Water-quality analysis

1. 서론

댐 상류유역에서 발생하는 오염물질의 하천 유입은 댐 저류수를 상수원수로 사용하는 주민의 건강을 위협하게 되며, 그에 따른 비상시 취수제한과 같은 안전체계 구축을 위해 하천별 수질관리시스템을 갖추어야 할 것이다.

특히 댐의 상류에서 유입되는 하천수질은 상수원수의 수질농도와 직결되기 때문에 보다 심도 있는 수질관리가 필요하다. 즉, 하천 유량과 오염도간의 상관관계 규명, 취수장에서 예측되는 오염도의 확률분포 제시 및 신뢰도 해석기법에 의한 수질예보 시스템의 구축 등 보다 과학적이고 체계적인 수질자료의 분석과 수질관리기법의 도입이 시급하다.

그러나 하천수질 해석을 위한 대부분의 연구는 실제 하천수질 변화에 포함된 자연적인 변동성을 고려하지 않고 확정론적 값으로서 수질관리대책을 수립하고 있다. 확정론적 모형에서의 하천 유량과 유속, 오염부하량, 각종 반응계수 등 수질관련 인자들은 평균값의 개념으로 해석이 수행

되지만 이들은 많은 불확실성을 내포하고 있기 때문에 해석결과에 대한 신뢰도 검증이 반드시 수반되어야 한다.

본 연구에서는 댐 상류에 위치한 하천과 저수지에서의 수질모의를 위해 최적 매개변수 결정 알고리즘을 이용한 확정론적 수질해석모형을 구축하고, 그 수질해석 결과를 체계적으로 분석하였다. 이를 위해 신뢰도 해석기법 가운데 MFOSM(Mean First-Order Second-Moment) 기법과 Monte-Carlo 기법을 도입한 수질해석을 실시하여 취수장 지점에서 주요 수질항목에 대한 오염도를 확률론적인 결과로 제시하였다.

이와 같은 신뢰도 분석은 모형에 대한 민감도의 평가와 수질 매개변수의 불확실도에 대한 정량화에 적용될 수 있으며, 모형의 불확실성 평가를 위한 일차 신뢰성 분석과 Monte-Carlo 모의와 같은 신뢰성 해석법에서 가장 중요한 것은 개개 기본변수들에 대한 고유의 불확실성을 특성화하는 것이다(Melching and Yoon, 1996). 신뢰도 분석에 관한 연구로는 Burger and Lettenmaier(1975), Tung and Hathhorn (1988) 그리고 Melching and Anmangandla(1992)가 Streeter-Phelps 식에 일차 신뢰성 분석법을 적용하고, 통계기법을 사용하여 불확실도를 예측하였다. Mailhot and Villeneuve

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

(2003)는 모형 매개변수의 불확실도를 토대로 모의결과의 불확실도를 예측하기 위해 FOSM(First-Order Second-Moment) 방법을 제시하였다.

국내에서는 전경수와 이길성(1993)이 남한강과 북한강유역에 QUAL2E 모형의 영향계수 추정을 통해 하천 수질해석을 실시한 이후, 백경원 등(1995), 김경섭 등(2004), 김상호와 최현상(2006)이 수질모형을 이용하여 하천에서의 수질분석을 실시하였으며, 김상호와 한건연(2000)은 낙동강유역에 대해 유한요소법을 이용하여 2차원 수질해석을 실시한 바 있다. 특히, 수질해석 결과에 대한 불확실성에 관한 연구사례로는 이흥근(1982)이 한강하류부의 수질변동에 대한 추계학적 특성을 분석하였으며, 한건연 등(1995)은 Monte-Carlo 해석을 이용하여 낙동강에 대해 추계학적 수질해석을 실시하였으며, Han 등(2001)은 한강에 대해 초과확률 개념을 이용하여 수질예보시스템을 구축하였다. 하지만, 김상단 등(2004)과 박재로 등(2005a, 2005b)의 연구와 같이 팔당호에 대한 수질영향분석을 수행한 연구사례는 있으나, 댐 상류에 위치한 저수지 구간에 대해 신뢰도 개념을 이용한 수질해석에 관한 연구는 매우 미미한 실정이다.

2. 연구방법

2.1. 하천 수질모의에 대한 신뢰도 기법

일반적으로 물리적 시스템의 모형에 존재하는 불확실성은 (i) 시스템을 나타내는 자연법칙에 대한 부족한 지식, (ii) 실험결과의 정확한 평가에 대한 계산상 결점, (iii) 실험의 정밀한 재현 불가능 또는 시스템의 입력자료 및 경계조건에 대한 불충분한 지식, 그리고 (iv) 프로세스 고유의 무작위 특성과 같은 원인들로부터 기인된다(Giri et al., 2001). 그러므로, 모형에 존재하는 매개변수에 대한 불확실성을 고려할 수 있는 과정이 필요하게 되는데, 입력 매개변수의 불확실도가 주어질 경우 신뢰도 분석을 통해 출력변수에 대한 위험도를 확률적으로 예측할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 확정론적 수질해석에 적용성이 널리 인정되고 있는 QUAL2E 모형에 MFOSM 기법과 Monte-Carlo 기법을 적용하여 신뢰도 해석을 수행하였다.

2.1.1. MFOSM 기법

FOSM(First-Order Second-Moment) 기법은 Tang and Yen (1972)이 구조물의 안전도 분석을 위해 사용한 이후 수리시스템의 위험도 산정에 적용되었다. FOSM 이론은 Taylor 급수 전개로부터 시작되는데 임의의 점 $P(X_{1p}, X_{2p}, X_{3p}, \dots, X_{np})$ 에서 $Y = G(x_i)$ 에 관한 Taylor 급수 전개는 식 (1)과 같이 기술될 수 있다.

$$Y = G(x_{1p}, x_{2p}, x_{3p}, \dots, x_{np}) + \sum_{i=1}^n (x_i - x_{ip}) \left(\frac{\partial G}{\partial X_i} \right)_p + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (X_i - x_{ip})(X_j - x_{jp}) \left(\frac{\partial^2 G}{\partial X_i \partial X_j} \right)_p + \text{higher order terms} \quad (1)$$

여기서 첨자 p 는 전개점 P 에서 계산되는 것을 의미한다. 일차 근사해는 Taylor 급수 전개식에서 2차 이상의 고차항을 절단함으로써 수식화시킬 수 있으며, 변수의 평균값 $X_m = (x_{m1}, x_{m2}, x_{m3}, \dots, x_{nm})$ 에서 Taylor 급수를 전개할 수 있으므로 Y 의 평균과 종속변수에 대한 분산은 입력 매개변수들이 통계적으로 독립이라고 할 경우 각각 식 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(Y) = G(x_{m1}, x_{m2}, x_{m3}, \dots, x_{nm}) \quad (2)$$

$$Var(Y) = \sum_{i=1}^n Var(X_i) \left(\frac{\partial G}{\partial X_i} \right)_m^2 \quad (3)$$

여기서 아래첨자 m 은 변수의 평균을 의미한다. 이와 같이 일차 근사해가 평균값에서 전개한 불확실한 매개변수의 최초 두 개 모멘트 즉, 평균과 분산만을 포함하고 있기 때문에 이러한 접근방법을 MFOSM(Mean First-Order Second-Moment)법이라 한다.

2.1.2. Monte-Carlo 모의기법

Monte-Carlo 모의는 무작위 입력변수 세트를 가지고 있는 복잡한 시스템을 수치적으로 조작하고 반복하는 수단이며, 입력변수들은 미리 결정되거나 가정된 확률분포로부터 무작위로 추출된다. 이러한 무작위 추출과정이 반복되면서 일련의 무작위 입력변수들에 대한 출력변수들의 결과 세트가 얻어지게 된다. 이러한 결과들은 현장실험으로부터 얻을 수 있는 결과 세트와도 유사하다. 그러므로, Monte-Carlo 모의의 결과는 통계적으로 다루어질 수 있으며, 통계적 예측과 추측법의 적용이 가능하다(Ang and Tang, 1984).

본 연구에서 Monte-Carlo 모의수행을 위하여 난수를 발생시키는 기본공식으로 식 (4), 그리고 식 (5)와 같은 배수합동법(multiplicative congruential generator)을 이용하였다.

$$X_{i+1} = aX_i \pmod{m} \quad (4)$$

$$U_i = \frac{X_i}{m} \quad (5)$$

여기서 $a = 16807$, $m = 2^{31} - 1$, (\pmod{m}) 은 modulus m 에 의한 나머지 값, X_i 는 균등난수를 발생시키기 위한 초기값, U_i 는 균등분포에 의한 난수를 나타내고 있다.

2.1.3. 신뢰도 분석

신뢰도는 시스템이 어떤 수행기준에 부합할 수 있는지에 관한 확률론적 척도로서 정의될 수 있으며, 시스템에 대한 신뢰도의 문제는 부하(load, L)에 대한 저항(resistance, R)과 같은 근본적인 문제로 고려될 수 있다.

위험도 P_f 는 신뢰도에 대한 여수(餘數)의 개념으로서 시

시스템이 설계된 기능을 수행하지 못할 확률 또는 파괴의 확률이며, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Risk = P_f = 1 - P_r = P(L > R) \quad (6)$$

여기서 $P(x)$ 는 사상 x 의 발생 확률이며, P_r 은 시스템의 신뢰도를 의미한다. 본 연구에서는 수질모의를 통한 하천 수질농도가 환경 기준치를 위배할 확률에 초점을 두고 있기 때문에 위험도 또는 초과확률이라는 개념을 통해 신뢰도 분석을 수행하고자 한다.

MFOSM 기법에 의한 초과확률은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으며, 이 식에서 신뢰도 지수 β 는 식 (8)과 같이 산정된다.

$$P_e = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (7)$$

$$\beta = \frac{E[R - \mu_o]}{\sigma_o} \quad (8)$$

여기서 σ_o 는 출력되는 수질항목의 농도에 대해 예측된 표준편차이고, μ_o 는 출력되는 수질항목의 농도에 대해 예측된 평균치이다. 그리고 $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포에 대한 적분치를 나타낸다. Monte-Carlo 기법을 이용한 초과확률의 산정은 식 (9)를 이용하게 되는데, 수질에서 위험도의 일반적인 의미는 기준 수질농도를 초과할 확률을 의미하나, DO의 경우는 기준 수질농도보다 낮을 확률을 의미하게 된다.

$$P_e = \frac{\text{number of model outcomes with } Z < 0}{\text{total number of simulations}} \quad (9)$$

여기서 $Z = S - L$ 이며, S 는 기준 농도이고, L 은 모의 수행된 농도를 의미한다.

2.2. 확정론적 수질해석

본 연구대상은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 계천의 매일수 위국에서 횡성댐까지 약 13.9 km를 대상구간으로 선정하였으며, 대상구간에 대한 하상자료는 횡성댐 수리검토용역 보고서(횡성군, 2000)와 계천 하천정비기본계획 보고서(강원도, 2000)를 참고하였다. Fig. 1에서 표시된 지점은 수질측정이 실시된 지점을 나타내고 있다.

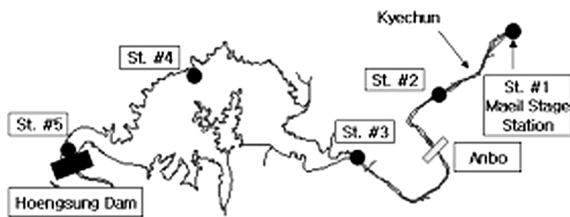


Fig. 1. Research area map.

2.2.1. 수리특성 분석

대상구간에 대한 수리학적 부등류 해석을 위해 수리학적 으로 유사한 특성을 가지는 것으로 판단되는 17개의 구간 (reach)으로 구분하였으며, 각 구간은 200 m 간격의 요소 (element)로 구성하였다. 또한 각 구간에 대한 유량계수의 산정을 위해 HEC-RAS 모형을 이용하여 2005년과 2006년에 발생한 유량규모별로 부등류 해석을 실시하고 하도내 각 지점에서의 수심, 통수단면적, 유속, 경심 등의 자료를 해석한 후, 그 결과를 구간별로 회귀분석하여 QUAL2E 모형에 적용되는 유속에 대한 유량계수 a , b 그리고 수심에 대한 유량계수 α , β 를 Table 1과 같이 산정하였다. 표에서 보는 바와 같이 8번 구간부터 횡성댐의 배수영향으로 인해 수심과 관련된 지수값(β)이 0에 가까운 작은 값으로 나타나고 있었으며, 유속과 관련된 계수값(a) 역시 매우 작게 나타나고 있었다.

Table 1. Discharge coefficients of study area

Reach number	a	b	α	β
1	0.5069	0.3047	0.2514	0.4079
2	0.1666	0.4595	0.4198	0.3415
3	0.1896	0.4224	0.3177	0.3385
4	0.3897	0.3132	0.1293	0.4819
5	0.5334	0.2442	0.2581	0.3675
6	0.3155	0.2331	0.1473	0.5316
7	0.0081	0.9205	2.3864	0.0661
8	0.0011	1.0069	7.6019	0.0002
9	0.0003	1.1063	10.3070	0.0000
10	0.0002	1.0694	13.1480	0.0000
11	0.0002	1.1305	16.0700	0.0000
12	0.0001	1.1076	17.7320	0.0000
13	0.0001	1.0550	20.2500	0.0000
14	0.0002	1.0295	22.9410	0.0000
15	0.0002	1.0540	24.6270	0.0000
16	0.0002	1.1365	25.9650	0.0000
17	0.0002	1.1267	28.3240	0.0000

2.2.2. 모형의 보정 및 검증

대상구간에 대한 모형의 보정과 검증을 위해 2005년 1월부터 2006년 6월까지 Fig. 1의 지점 1과 2에서 수온, DO, BOD를 비롯한 다양한 수질자료를 측정하였으며, 그 외 지점들의 수질자료는 환경부(2005, 2006) 측정자료를 활용하였다. 수집된 수질자료를 이용하여 QUAL2E 모형을 구성하고 있는 주요 매개변수들에 대한 최적 매개변수를 도출하기 위해 최적화 알고리즘인 BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) 기법(백경원 등, 1995)을 이용하여 모형의 보정을 실시하였다. 추정대상 반응계수를 결정하기 위해서 민감도 분석을 실시하였으며, 반응계수에 민감한 수질인 자료로서는 DO, BOD 등으로 나타났다. DO와 BOD는 BOD의 탈산소계수 k_1 , 침전에 의한 BOD의 제거율 계수 k_3 , 하상 산소요구율 계수 k_4 에 민감하였고, 총질소와 총인의 경우 이들의 각 구성성분에 대한 민감도는 크게 나타났으

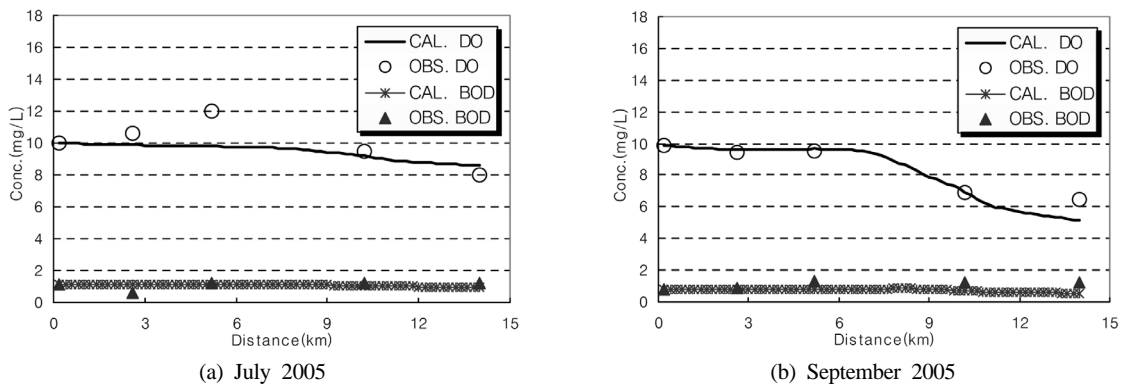


Fig. 2. Calibration results.

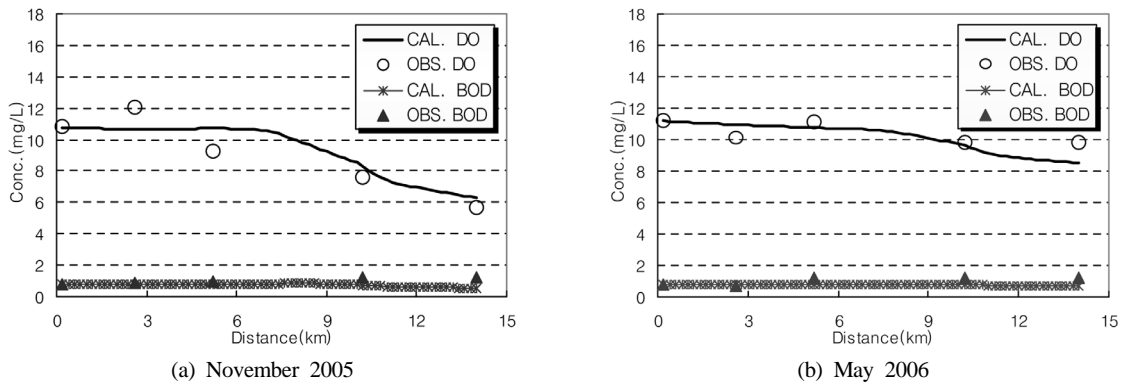


Fig. 3. Verification results.

나 전체적인 민감도는 비교적 작게 나타나 고려하지 않았다. Fig. 2는 QUAL2E 모형에 대한 보정결과를 나타내고 있으며, 이를 통해 결정된 매개변수들에 대한 검증결과는 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 매일수위국에서부터 황성호의 배수영향이 미치는 7 km 지점까지는 DO 값의 변화가 크게 나타나지 않다가 7 km 지점부터 DO 값이 급격히 줄어들고 있었으며, 이러한 DO 변화는 실측자료와도 잘 일치하는 것으로 나타났다. BOD는 전체적인 대상구간에서 값의 큰 차이가 없었으며, 실측자료와도 비교적 잘 일치하고 있었다.

3. 결과 및 고찰

QUAL2E 모형을 이용한 확정론적 수질해석 결과에 대한 주요 수질항목별 불확실성을 정량적으로 살펴보기 위해 Table 2와 같이 황성호에 위치한 3개 지점에 대해 MFOSM 기법과 Monte-Carlo 기법을 적용하였다.

3.1. 수질모형의 불확실도

QUAL2E 모형에 포함되어 있는 여러 가지 매개변수들의 불확실성은 실제 자연 하천계에서 큰 불확실도를 가질 수 있는 상류단의 유량자료 및 수질자료군(FFHW), 수리학적 반응계수군(HYDR) 그리고 주요 수질반응계수군(RXNC)을 대상으로 고려하였으며, 이러한 조건들을 모두 고려한 군(ALL)에 대해서도 비교 검토하였다. FFHW, HYDR, RXNC

Table 2. Stations for uncertainty test

Station number	Reach-element number	Distance from upstream (km)	Remark
3	7 - 1	5.0	Goobang Bridge
4	12 - 2	10.0	-
5	17 - 4	13.9	Upstream of Dam

등에 대한 불확실도는 QUAL2E 사용설명서(Brown and Barnwell, 1987)에서 제시하고 있는 입력변수 불확실도의 전형적인 범위를 벗어나지 않는 범위 내에서 선택하였다. Table 3은 각 입력 매개변수에 대한 불확실도를 나타내고 있으며, 이들 입력 매개변수들은 정규분포형으로 서로 상관성이 없는 것으로 가정하였다.

이와 같은 모형 내 매개변수의 불확실도를 대상으로 MFOSM 기법과 함께 Monte-Carlo 기법을 이용하여 불확실도 해석을 실시하였다. Monte-Carlo 모의(MCS)는 식 (4)와 같은 난수 발생자를 이용하여 난수를 발생하였다. 또한 Monte-Carlo 모의를 위한 적정 모의횟수를 결정하기 위해 동일한 자료에 대해 모의횟수만 증가시킨 자료들을 가지고 모의하여 임의지점에서의 예측된 표준편차에 대한 모집단 평균의 95% 신뢰구간을 산정하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 DO와 BOD 모두 2000회의 모의횟수에서 허용관계치에 들어가는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 QUAL2E 사용설명서(Brown and Barnwell, 1987)에서도 유사한 결과를 보여 주고 있다. QUAL2E 모형에 대해 MFOSM 기법

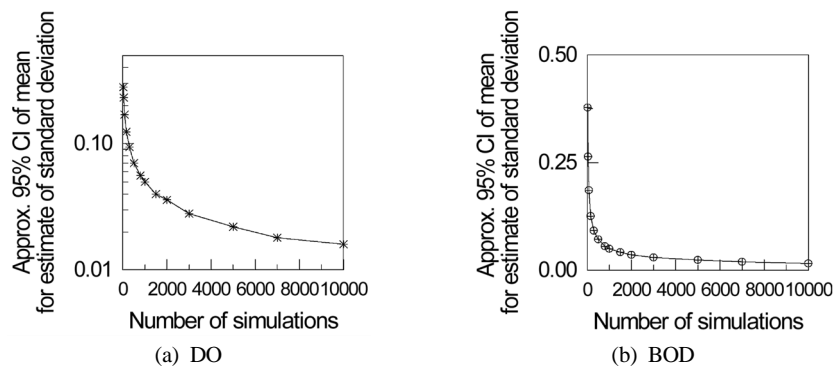


Fig. 4. Convergent characteristics of Monte-Carlo simulation.

Table 3. Uncertainty of input parameters

No.	Parameter		C.O.V. (%)	
	Group	Name	This study	Brown and Barnwell
1	FFHW	Headwater flow	5.0	-
2		Headwater DO	10.0	5 - 10
3		Headwater BOD	20.0	10 - 20
4	HYDR	Dispersion constant	15.0	5 - 15
5		Discharge constant for velocity	15.0	5 - 15
6		Discharge exponent for velocity	5.0	5 - 15
7		Discharge constant for depth	15.0	5 - 15
8		Discharge exponent for depth	5.0	5 - 15
9		Manning coefficient	10.0	5 - 15
10	RXNC	BOD decay rate	20.0	10 - 25
11		BOD settling rate	20.0	10 - 25
12		SOD rate	20.0	10 - 25

을 사용한 DO와 BOD의 평균, 표준편차, 그리고 분산계수에 대한 계산 결과는 Monte-Carlo 기법을 이용한 결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

이제 각 입력변수의 종류별 불확실도에 따른 출력변수의 불확실도 분포 양상을 살펴보기 위해 Monte-Carlo 기법을 이용한 2000회의 모의수행 결과 중 DO와 BOD의 분포를 살펴보았다. 대상 지점은 횡성호로 유입되는 계천의 하류단인 지점 3과 횡성댐 직상류에 위치한 지점 5에 대해 살펴보았다.

먼저 지점 3에 대한 4가지 매개변수 그룹별 DO와 BOD의 분포양상을 Fig. 5(a), (b)에 나타내었다. 수심이 얇고 횡성호보다 유속이 상대적으로 빠른 수리학적 특성을 나타내는 이 지점에서는 DO의 경우 수리계수(HYDR)와 반응계수(RXNC)에 대해서는 거의 영향이 없는 것으로 나타났으며, 상류단인 매일수위국의 유량 및 수질자료(FFHW)에 따라

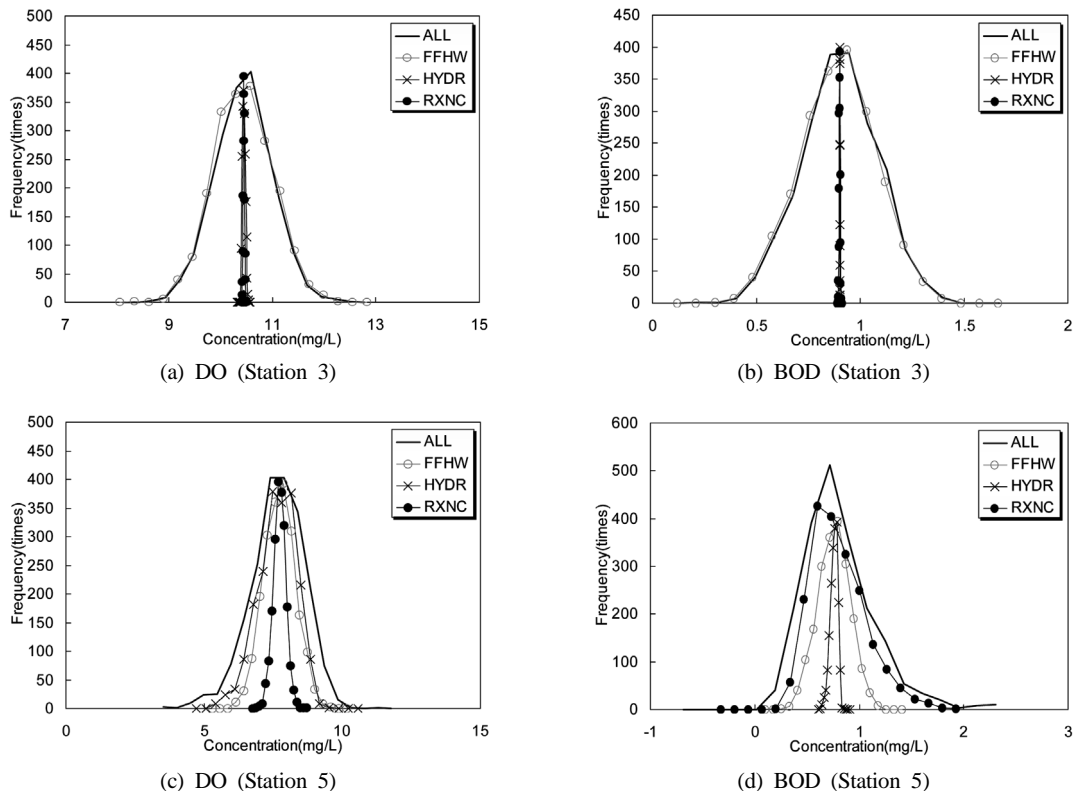


Fig. 5. Frequency distributions from parameter group.

Table 4. Results of risk analysis

(a) Station 4						(b) Station 5					
Nonexceedance probability in DO (%)			Exceedance probability in BOD (%)			Nonexceedance probability in DO (%)			Exceedance probability in BOD (%)		
Conc. (mg/L)	MFOSM	MCS	Conc. (mg/L)	MFOSM	MCS	Conc. (mg/L)	MFOSM	MCS	Conc. (mg/L)	MFOSM	MCS
6.00	0.00	0.00	0.30	99.89	99.95	3.5	0.00	0.15	0.15	99.98	99.85
6.35	0.00	0.10	0.40	99.40	99.25	4.0	0.00	0.20	0.30	99.59	97.30
6.70	0.00	0.15	0.50	97.48	96.05	4.5	0.00	0.45	0.45	96.30	88.30
7.05	0.02	0.80	0.60	91.99	88.65	5.0	0.00	1.45	0.60	82.37	71.65
7.40	0.19	1.85	0.70	80.27	76.85	5.5	0.02	2.50	0.75	52.92	50.85
7.75	1.15	5.20	0.80	61.74	59.90	6.0	0.27	5.20	0.90	21.68	32.15
8.10	4.95	11.10	0.90	39.96	39.50	6.5	2.42	10.75	1.05	5.05	19.75
8.45	15.25	22.65	1.00	20.98	25.10	7.0	12.18	22.15	1.20	0.63	11.75
8.80	34.40	40.05	1.10	8.69	14.70	7.5	36.00	39.75	1.35	0.04	6.25
9.15	58.81	59.55	1.20	2.79	7.50	8.0	67.33	61.80	1.50	0.00	3.90
9.50	80.15	76.95	1.30	0.68	3.20	8.5	89.56	81.30	1.65	0.00	2.60
9.85	92.94	89.30	1.40	0.13	1.35	9.0	98.05	93.95	1.80	0.00	1.50
10.20	98.19	96.25	1.50	0.02	0.70	9.5	99.80	98.80	1.95	0.00	1.05
10.55	99.67	99.00	1.60	0.00	0.35	10.0	99.99	99.85	2.10	0.00	0.80
10.90	99.96	99.80	1.70	0.00	0.20	10.5	100.00	99.95	2.25	0.00	0.50

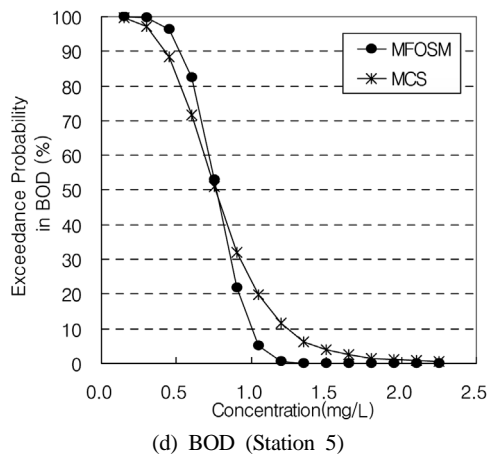
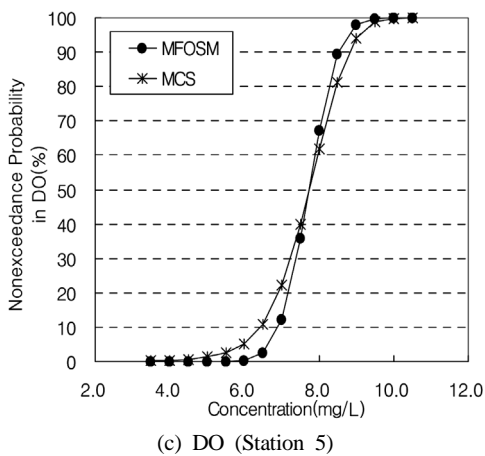
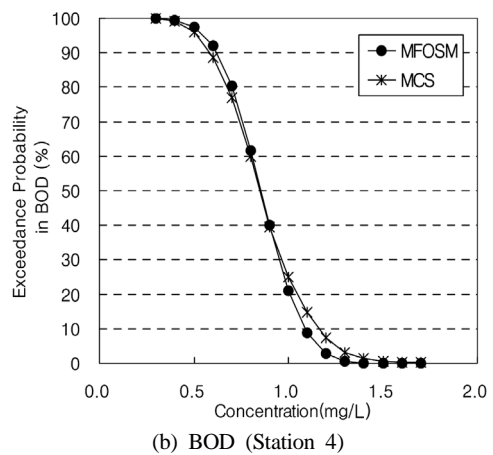
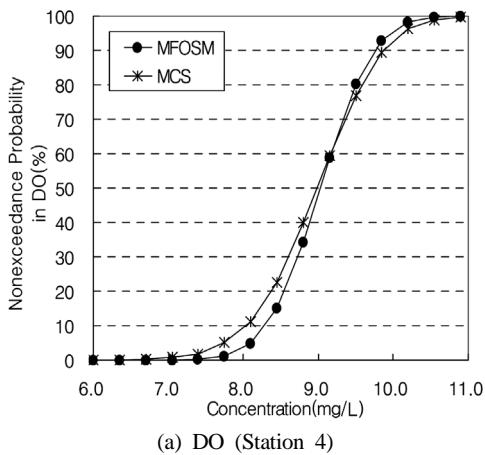


Fig. 6. Risk curve of DO and BOD.

모의결과의 분포가 크게 나타나고 있었다. 이러한 결과는 BOD에 대해서도 동일한 양상을 나타내고 있었다. 황성담 직상류단인 지점 5에 대한 모의결과는 Fig. 5(c),

(d)에 도시하였다. 그림에서 보듯이 DO는 반응계수(RXNC)에 대해서는 그다지 민감하지 않았지만, 상류단인 매일수위국에서의 유량 및 수질자료(FHWW)와 수리계수(HYDR)에

민감한 것으로 나타났으며, 9개의 변수 모두를 고려했을 경우 이러한 영향은 더욱 크게 나타나고 있었다. 하지만 BOD는 수리계수(HYDR)의 영향은 다소 적었으며, 매일수 위국에서의 입력자료(FFHW)보다 반응계수(RXNC)의 영향이 더 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

따라서 흐름의 유속이 빠른 지점 3과 같은 하천구간에서는 상류단의 유량과 수질조건이 DO와 BOD 값의 결정에 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 수심이 매우 깊고 유속이 매우 느린 지점 5에서는 DO의 경우 상류단 자료(FFHW)와 수리계수(HYDR)의 영향에, BOD의 경우 반응계수(RXNC)의 영향에 가장 민감한 것으로 나타나 수질모의를 할 경우 이들 매개변수 값의 선정에 보다 신중을 기하여야 할 것으로 판단된다.

3.2. 신뢰도 분석

자연 하천에 대한 수질모의를 통하여 여러 가지 매개변수들에 대한 불확실성을 고려하였을 경우 관심 지점에서 발생가능한 수질농도가 하천수질 환경기준치를 위배할 확률을 판단할 수 있도록 지점 4와 지점 5에 대해 신뢰도 분석을 수행하였다.

지점 4에 대한 DO와 BOD의 비초과확률과 초과확률은 Table 4(a)와 Fig. 6(a), (b)에 나타나 있는데, DO의 경우 하천/호소수질기준 1등급인 7.5 mg/L를 초과하지 않을 확률은 MFOSM 기법의 경우 0.33%로 나타났으며, Monte-Carlo 기법에서는 2.60%로 나타나 대체로 1등급의 수질상태임을 확인할 수 있었다. BOD의 경우는 1등급 수질기준인 1 mg/L를 초과할 확률은 MFOSM 기법에서는 20.98%로 나타났지만, Monte-Carlo 기법에서는 25.10%로 조금 더 높게 나타났다. 하지만 2등급 수질기준인 3 mg/L보다 더 높아질 확률은 0.0%로 나타났다.

Table 4(b)와 Fig. 6(c), (d)에서는 지점 5에 대한 DO와 BOD의 비초과확률과 초과확률을 나타내고 있다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 DO가 1등급 수질기준 7.5 mg/L보다 낮은 확률은 MFOSM 기법에서는 36.00%로 나타났으나 Monte-Carlo 기법에서는 39.75%로 나타났다. 하지만 2등급 기준인 5 mg/L보다 낮은 확률은 MFOSM 기법은 0.0%로 나타났지만 Monte-Carlo 기법에서는 1.45%로 나타나 취수장 부근의 수질이 2등급 이하로 떨어질 확률은 매우 낮은 것으로 나타났다. BOD의 경우 하천수질기준 1등급인 1 mg/L을 초과할 확률은 MFOSM 기법에서는 8.78%로 나타났으며, Monte-Carlo 기법에서는 23.30%로 조금 더 높게 나타났다. 하지만 2등급 기준인 3 mg/L을 초과할 확률은 MFOSM 기법과 Monte-Carlo 기법 모두 0.0%로 나타나 대체적으로 BOD를 기준으로 살펴보았을 때에는 1등급의 수질을 가질 확률이 높은 것으로 나타났다.

Fig. 6의 주요 지점에 대한 DO와 BOD의 수질기준을 위배할 확률인 위험도 곡선은 Han 등(2001)의 결과와 유사한 양상을 나타내고 있었으며, 오염도가 높은 지류가 하천으로 유입되거나 오염물 유출사고와 같은 점오염원 사고가 발생하였을 경우 하천이나 저수지에서 수질변화를 정량적이고

확률적으로 제시할 수 있어 보다 효과적인 수질대응책 마련에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 댐 상류유역에 대한 하천 수질변화를 보다 정확히 예측하기 위한 확정론적 해석모형인 최적 수질관리모형을 구축하고, 모의결과에 대한 신뢰도 해석을 적용하여 추계학적 수질해석을 실시하였다. 이를 위해 강원도 횡성군의 남한강 제1지류인 섬강에 위치한 계천의 매일수 위국에서부터 횡성댐까지 13.9 km 구간에 대해 본 연구모형을 적용하였으며, 연구내용을 다음과 같이 요약하였다.

- 1) 대상구간에 대한 부등류 해석을 통해 수리학적 매개변수를 예측한 후, 수질모의를 위한 최적 반응계수의 산정을 위해 BFGS 기법을 적용하여 모형의 보정 및 검증을 실시하였다.
- 2) QUAL2E 모형의 수리/수질 매개변수들에 존재하는 불확실성으로 인한 모의결과의 변동성을 살펴보기 위해 Monte-Carlo 기법을 이용하여 다양한 입력자료군별로 모의결과에 미치는 영향을 살펴보았다. 그 결과 흐름의 유속이 빠른 하천구간에서는 상류단의 유량과 수질자료가 DO 및 BOD와 같은 수질변수들의 값 결정에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 유속이 느린 저수지 구간에서는 수리계수나 수질반응계수의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다.
- 3) 확정론적 수질모형을 이용한 수질 모의결과의 신뢰성을 살펴보기 위해 MFOSM 기법과 Monte-Carlo 기법을 이용하여 신뢰도 해석을 실시하였다. 이를 통해서 대상구간 내 주요 지점에서 모형을 통한 예상 수질농도가 하천수질 기준을 위배할 확률을 계산하여, 기준 수질에 대한 주요 지점별 오염위험도를 제시하였다.

이와 같은 연구결과를 통해 매일수위국 하류 계천구간과 횡성호에 대한 수질변동 양상을 수질관리모형을 통해 확률적으로 분석할 수 있어 보다 효율적인 수질관리를 수행할 수 있을 것으로 기대되며, 본 연구에서의 해석기법은 국내 다른 하천 유역에서도 확산 적용되어 하천수질 관리 대책 수립에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2005-003-D00400)을 받아 연구되었으며, 일부는 2006년도 상지대학교 교내 연구비 지원에 의해 연구되었기에 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 영향 분석. *한국물환경학회지*, **20**(6), pp. 703-707.
- 김상호, 최현상(2006). 부동류해석을 이용한 QUAL2E 모형의 개선. *한국물환경학회지*, **22**(6), pp. 1144-1150.
- 김상호, 한건연(2000). 유한요소법에 의한 낙동강유역에서의 2차원 수질해석. *대한토목학회논문집*, **20**(4B), pp. 525-533.
- 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 - 북한강, 경안천을 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.
- 이흥근(1982). 한강하류부의 수질변동에 대한 추계학적 특성. 박사학위논문, 서울대학교.
- 전경수, 이길성(1993). 영향계수를 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정. *대한토목학회논문집*, **13**(4), pp. 163-176.
- 한건연, 김상현, 박재홍(1995). 하천수질변동의 예측을 위한 추계학적 수질해석모형의 개발. *한국수자원학회지*, **28**(2), pp. 103-113.
- 환경부(2005, 2006). *환경통계년감*.
- 황성균(2000). *황성댐 수리검토용역*.
- Ang, A. H. and Tang, W. H. (1984). *Probability concepts in engineering planning and design*. Volume II, John Wiley & Sons.
- 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.
- Burger, S. J. and Lettenmaier, D. P. (1975). Probabilistic methods in stream quality management. *Water Resources Bulletin*, **11**(1), pp. 115-130.
- Giri, B. S., Karimi, I. A. and Ray, M. B. (2001). Modeling and Monte Carlo simulation of TCDD transport in a river. *Water Research*, **35**(5), pp. 1263-1279.
- Han, K. Y., Kim, S. H. and Bae, D. H. (2001). A stochastic water quality analysis using reliability method. *J. of the American Water Resources Association*, **37**(3), pp. 1-14.
- Mailhot, A. and Villeneuve, J. P. (2003). Mean-value second-order uncertainty analysis method: application to water quality modelling. *Advances in Water Resources*, **26**, pp. 491-499.
- Melching, C. S. and Anmangandla, S. (1992). Improved first-order uncertainty method for water-quality modeling. *J. of Environmental Engineering, ASCE*, **118**(5), pp. 791-805.
- Melching, C. S. and Yoon, C. G. (1996). Key sources of uncertainty in QUAL2E model of Passaic River. *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **122**(2), pp. 105-113.
- Tang, W. H. and Yen, B. C. (1972). Hydrologic and hydraulic design under uncertainties, *Proc. of Inter. Symposium on Uncertainties in Hydrologic and Water Resources Systems*, Tucson, Arizona, No. 2, pp. 868-882.
- Tung, Y. K. and Hathhorn, W. E. (1988). Assessment of probability distribution of dissolved oxygen deficit. *J. of Env. Eng. Div., ASCE*, **114**(6), pp. 1421-1435.