

불확실성을 고려한 통합유역모델링

Integrated Watershed Modeling Under Uncertainty

함 중 화* · 윤 춘 경**† · 다니엘 라옥스***

Jong-Hwa Ham · Chun Gyong Yoon · Daniel P. Loucks

Abstract

The uncertainty in water quality model predictions is inevitably high due to natural stochasticity, model uncertainty, and parameter uncertainty. An integrated modeling system under uncertainty was described and demonstrated for use in watershed management and receiving-water quality prediction. A watershed model (HSPF), a receiving water quality model (WASP), and a wetland model (NPS-WET) were incorporated into an integrated modeling system (modified-BASINS) and applied to the Hwaseong Reservoir watershed. Reservoir water quality was predicted using the calibrated integrated modeling system, and the deterministic integrated modeling output was useful for estimating mean water quality given future watershed conditions and assessing the spatial distribution of pollutant loads. A Monte Carlo simulation was used to investigate the effect of various uncertainties on output prediction. Without pollution control measures in the watershed, the concentrations of total nitrogen (T-N) and total phosphorous (T-P) in the Hwaseong Reservoir, considering uncertainty, would be less than about 4.8 and 0.26 mg L⁻¹, respectively, with 95% confidence. The effects of two watershed management practices, a wastewater treatment plant (WWTP) and a constructed wetland (WETLAND), were evaluated. The combined scenario (WWTP + WETLAND) was the most effective at improving reservoir water quality, bringing concentrations of T-N and T-P in the Hwaseong Reservoir to less than 3.54 and 0.15 mg L⁻¹, 26.7 and 42.9% improvements, respectively, with 95% confidence. Overall, the Monte Carlo simulation in the integrated modeling system was practical for estimating uncertainty and reliable in water quality prediction. The approach described here may allow decisions to be made based on probability and level of risk, and its application is recommended.

Keywords : Integrated modeling system, modified-BASINS, Monte Carlo simulation, water quality prediction, watershed management

1. 서 론

1970년대 이후 부족한 농지 및 수자원을 확보하기

위해 많은 간척사업이 이루어졌으나, 간척사업으로 만들어진 하구담수호로 유역의 많은 오염원들이 하천과 수로를 통해 유입되면서 많은 하구담수호들이 부영양화 되었다. 일반적으로 담수호 수질개선을 위한 여러 유역관리방안 중 최적방안을 선택하는 과정에는 수질예측모델이 사용된다. 유역관리방안을 적용할 경우 유역에서 하구담수호로 유입되는 오염부하량을 산정하고, 이와 같은 오염부하량이 하구담수호로 유

* 코넬대학교 토목환경공학과 박사후연구원

** 건국대학교 환경과학과

*** 코넬대학교 토목환경공학과

† Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3747

Fax: +82-2-446-2543

E-mail address: chunyoona@konkuk.ac.kr

입되었을 경우 예상되는 수질을 예측할 수 있는 연계된 호소수질 예측모델이 필요하다. 보다 합리적인 수질을 모의하기 위해서는 반듯이 담수호로 유입되는 오염부하량을 모의할 수 있는 유역모델과 예상되는 담수호의 수질을 예측할 수 있는 수질모델을 함께 연계 적용하여야 한다(USEPA, 1997). 유역모델과 수질모델을 연계하여 적용할 수 있는 통합모델링 시스템(Integrated modeling systems)은 GIS 데이터 베이스와 연계하여 다양한 분석이 가능한 모듈을 포함하고 있어 유역관리 및 모델링에 매우 유용한 시스템이다(He et al., 2001).

유역관리를 위해 많은 연구자들이 모델을 이용하고 있으나, 대부분의 연구자들은 미래의 수질 예측을 위해 하나의 입력자료 만을 이용하여 수질을 예측하고 있다. 이 경우 입력 자료는 미래의 유역, 기상 및 담수호의 조건을 정확하게 반영하는 값이어야 한다. 그러나 현실적으로 미래의 여러 조건들과 정확히 일치하는 입력자료를 생성하여 모델을 구동하는 것은 매우 어렵다. 이는 미래의 여러 조건들에 대해 불확실한 요소들이 너무 많기 때문이다. 이렇게 미래의 유역조건과 일치하지 않은 입력 자료를 이용하여 수질을 예측하고 유역관리방안을 수립할 경우 잘못된 방안을 선택할 가능성이 높다. 그러므로 수질예측을 위해서는 여러 불확실한 요소를 반영하여 수질을 예측하여야 한다(Somlyody and Wets, 1988; Eckhardt et al., 2003).

모델은 복잡한 자연계를 단순화시켜 수학적으로 계산하기 때문에 필연적으로 오류를 포함하고 있다. 비록 모델의 구조가 완벽히 자연계를 묘사할 수 있더라도, 여전히 모델의 모의 결과에는 초기조건과 모델의 parameter에 대한 불확실성 때문에 오류를 갖고 있기 마련이다. 모델을 이용한 수질모의에 있어서 다양한 경로를 통해 불확실한 요소들이 모델의 결과 값에 영향을 미치게 된다. 수질모의에 있어서 불확실성은 다음과 같이 분류할 수 있다. ① 모델 구조 자체의 불확실성, ② 모델의 반응상수를 포함한 parameter들의 불확실성, 그리고 ③ 미래의 유역 및 자연조건을 예측하는 과정에서 발생하는 불확실성(Beck, 1987; Yoon, 1994) 등이 있다.

본 연구에서는 유역관리자가 불확실성의 영향을 이

해하는데 통합모델이 어떻게 사용될 수 있는지를 현장적용사례를 통하여 설명하고, 입력 자료의 불확실성을 고려하여 특정 유역관리방안이 담수호의 수질 개선에 얼마나 도움이 되는지를 평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 통합유역관리시스템

본 연구에서 보다 정확한 호소 수질 모의를 위해 유역모델과 수질모델을 통합하여 적용하였다. 유역모델과 저수지의 수질모델로는 각각 HSPF(Hydrological Simulation Program - FORTRAN)와 WASP(Water Quality Analysis Simulation Program)을 선택하였으며, 통합유역관리시스템으로 USEPA에서 개발한 BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources)를 선택하였다. BASINS는 GIS를 이용하여 토지이용이나 점오염부하 등의 공간정보를 분석하며, 하천수질모델인 QUAL2E와 유역유출모델인 SWAT(Soil & Water Assessment Tool)와 HSPF 등을 포함하는 통합유역관리시스템이다(USEPA, 2001). 또한 BASINS는 GIS 상용프로그램인 Arc-View를 기반으로 수치지도 생성과 공간분석, 자료의 질의와 추출 등의 방법을 유역분석에 종합적으로 사용한다. 본 연구에서는 BASINS가 호소수질모델인 WASP모형을 포함하고 있지 않기 때문에, WASP모델과 전·후처리 프로그램을 포함하도록 BASINS를 수정하였으며, 수정된 BASINS의 흐름도는 Fig. 1과 같다.

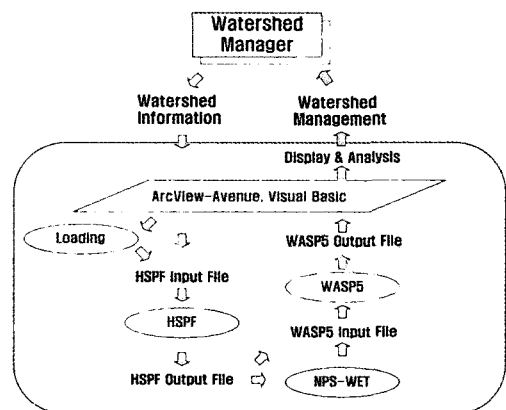


Fig. 1 Modified-BASINS flowchart

2. 점오염원 산정 모듈

Arc-View에 입력된 점오염원 DB와 소유역 및 행정구역 GIS layer로부터 소유역 및 동·리별 점오염원의 배출부하량을 산정할 수 있는 부하량 산정모듈을 개발하였다. 점오염원으로는 생활계, 축산계, 산업계 및 하수처리장을 고려하였으며, 배출부하량은 국립환경연구원 오염총량관리지침의 오염원산정방법에 준하여 산정하였다. 또한 유달부하량을 계산하기 위해 Fig. 2와 같은 개념을 도입하여 적용하였다. 각 소유역의 동·리로부터 배출된 배출부하량은 동·리의 중심으로부터 가장 가까운 하천까지 이동하면서, 이동시간에 대해 1차 반응식에 따라 감소한다고 가정하였다.

$$\frac{dL}{dt} = -kL, \quad L = L_0 \times e^{-kt} \quad (1)$$

L_0 는 오염원으로부터 배출된 배출부하량(kg day⁻¹), L 은 하천으로 유입되는 유달부하량(kg day⁻¹), t 는 오염원으로부터 하천까지 이동한 유달시간(day)이다. 본 연구에서는 유달시간(t) 대신 유달거리(l)를 이용해 유달부하량을 산정하였으며, 식 (1)을 식 (2)와 같

이 수정하였다. 소유역내에서 오염원으로부터 가까운 하천까지의 유달거리(l)는 GIS를 이용하여 계산하였다. 분해 상수 k 는 하천에서 실측한 부하량(유달부하량, L), 계산된 배출부하량(L_0) 및 유달거리(l)를 이용해 회귀분석을 통해 산정하였다.

$$\frac{dL}{dl} = -kL, \quad L = L_0 \times e^{-kl} \quad (2)$$

3. 습지모델개발

유역의 비점오염원을 제어하는 방법 중 하나인 인공습지를 유역에 조성할 경우 인공습지가 하류의 저수지 수질에 미치는 영향을 분석하기 위해 이전 연구(Ham, 2005)에서 개발된 습지모형인 NPS-WET를 적용하였다. 습지모형은 9개의 부모모델 - hydrologic, vegetative, periphyton, sediment, phosphorus, microbe, carbon, oxygen, and nitrogen - 로 구성되어 있으며, 유기물 및 영양물질의 동적모의가 가능하다. 습지를 하나의 완전혼합반응조로 가정하였으며, 수체와 sediment의 상호작용을 모의할 수 있도록 습지는 3개의 layer(water column, active sediment, deep sediment)로 나누어져 있다.

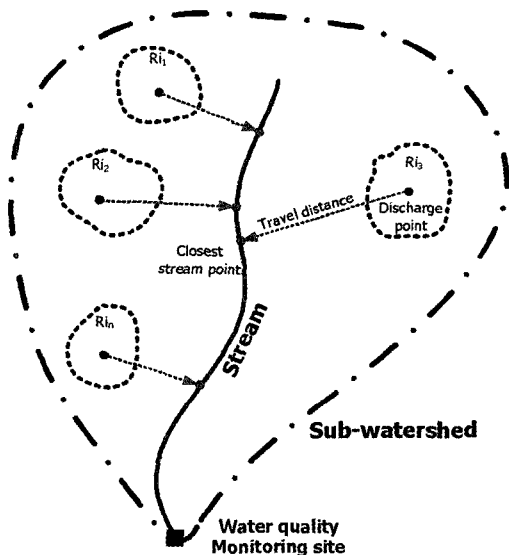


Fig. 2 Conceptual diagram of point source load calculation module

4. 불확실성 분석방법

모델링과정 중 다양한 불확실 요소들이 모델결과에 영향을 미치게 되며, 불확실 요소에는 관측자료의 오차, 모델입력자료의 오차, 모델 parameter의 오차, 모델 검·보정과정에서의 오차, 모델결과를 해석하는 과정에서의 오차 등 다양하게 포함될 수 있다. 모델의 검·보정과정은 모델예측자료와 관측자료 사이에 오차를 체계적으로 분석함으로써 나타낼 수 있는데, 이들 분석은 검·보정에 사용된 모델입력자료, parameter 값, 모델알고리즘, 보정의 정확성, 그리고 관측자료의 정확성에 대한 평가가 수반된다. 이러한 불확실한 요소들이 모델링 결과에 미치는 영향을 분석하기 위해 Monte Carlo simulation을 적용하였다. Monte Carlo simulation은 모델의 입력변수를 확률

분포함수로 생각하고, 정의된 확률분포 범위 내에서 입력변수 값을 임의로 선택하여 모델의 입력자료를 생성하고 모의 결과값을 얻는 과정을 반복 수행하여 입력자료의 불확실성이 반영된 모의 결과의 확률분포를 얻는 기법이다(Annan, 2001). 최적의 모델 모의횟수를 결정하기 위해 250~2,000번의 모의횟수에 대해 모델 모의 결과를 분석한 결과 1,000번 이상에서는 모델 모의 결과값이 모의횟수에 대해 거의 차이를 보이지 않았다. 그러므로 본 연구에서는 1,000번의 모델 모의횟수를 이용하여 수질을 예측하였다. 본 연구에서는 예측한 2012년의 기상자료 및 점오염원과 WASP 모델 parameter값의 불확실성이 클 것으로 판단되어, 이 3가지 요소에 대해 불확실성 분석을 실시하였다. 기상자료의 불확실성 분석에서 미래의 기상은 과거 40년 동안의 연간 자료와 동일하다고 가정하고, 미래의 기상자료로 과거 40년간의 연간 기상자료 중 하나를 임의로 선택하여 미래의 기상자료로 이용하였다. 점오염원 예측의 불확실성 분석에서 미래의 점오염원의 평균값은 앞의 연구에서 예측한 점오염원과 동일한 값을 사용했으며, 이 값이 평균에 대해 30%의 표준편차를 갖는다고 가정하였다. WASP의 parameter값은 Table 1과 같이 평균과 표준편차를 갖는다고 가정하였다. 본 연구에서는 WASP의 parameter값만 불확실한 것으로 가정하였는데, 그 이유는 HSPF모델과 NPS-WET모델은 실측값을 이용해 보정하였기 때문이다. WASP의 모든 parameter들이 불확실하지만, 모델 결과 값에 큰 영향을 주는 13개의 parameter에 대해서만 불확실성 분석을 실시하였다. 미래의 점오염원과 WASP 모델의 parameter값은 정규분포를 갖는다고 가정하였다.

5. 대상유역

대상유역으로는 경기도 화성시에 위치한 화성호 유역으로, 유역면적은 화성호(1,739 ha)를 제외하면 21,850 ha이다. 화성호 유역의 토지이용은 농지가 43%, 산림이 22%, 간척지가 21%, 시가지가 7%, 기타가 7%로 구성되어 있다. 화성지구간척개발사업은 1991년에 외곽공사를 시작해 2002년에 최종 끝물막이 공사를 완

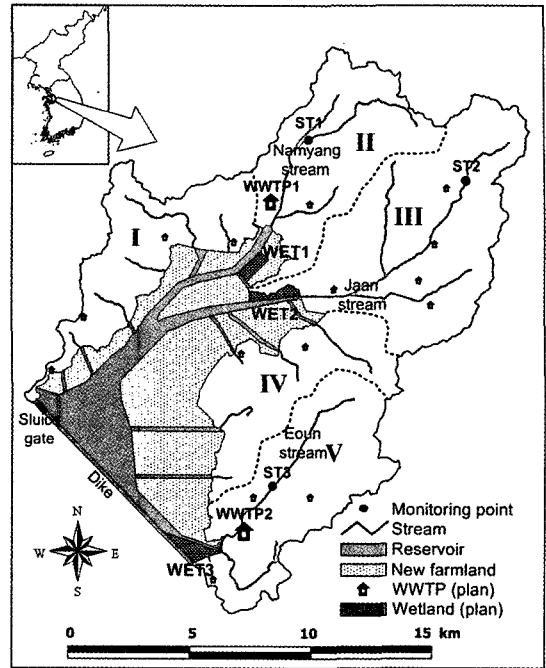


Fig. 3 Map showing the Hwaseong watershed and monitoring locations

료했으며, 2012년에 사업종료 예정이다. 새로 조성된 화성호의 장래수질에 대해 최근 환경단체에서 수질문제를 거론하고 있는 상태이며, 장래 화성호의 수질이 목표기준에 적합하도록 하기 위한 여러 수질보전대책이 추진되고 있는 유역이다. 2002년부터 유역과 호내에 환경기초시설 및 수질개선시설이 설치되기 전까지 화성호의 수질을 관리하기 위해 배수갑문을 통해 해수를 유통시키고 있는 중이다.

III. 결과 및 고찰

1. 통합유역관리시스템 보정

통합유역관리시스템을 이용해 미래의 수질을 예측하기 전에 실측한 유량 및 수질자료를 이용해 통합유역관리시스템을 보정하였다. 유역모델인 HSPF의 모의결과는 수질측정지점 ST1에서 실측한 유량 및 수질자료를 이용해 보정을 하였으며, 습지모델인 NPS-WET은 2003년 충남 당진군 석문간척지 입구에 설치하여 실험중인 석문습지에서 실측한 자료를 이용해

보정을 하였다. HSPF의 유량, T-N 및 T-P의 모의값은 실측값과 유사하게 보정되었으며, NPS-WET 모델의 모의값 역시 실측값과 유사하게 보정되었다 (Fig. 4). 습지의 수심을 모의한 결과를 보면, 습지로의 물공급이 중단되었을 때 습지수심의 모의값이 실측값과 비슷하게 감소하였는데, 이는 습지모델이 습지의 침투 및 증발산을 잘 모의할 수 있기 때문이라 생각된다. 여름 장마철에 일부 T-P 모의값이 실측값

보다 낮게 모의되었는데, 이는 습지모델의 입력자료로 이용되는 집중강우기간 동안 습지로 유입되는 T-P의 농도에 대한 실측자료가 부족하였기 때문이라 판단된다.

새로 조성된 화성호가 물리적으로 안정적이지 못하고, 화성호의 수질저하를 막기 위해 배수갑문을 통해 해수가 유통되고 있기 때문에 화성호의 수질예측을 위한 WASP모델은 보정하지 않았다. WASP모델을 현상태의 화성호에 대해 보정을 하더라도, 보정된 모델의 parameter값은 담수와 해수가 섞여있는 상태의 값으로 미래에 담수만으로 이루어진 화성호의 parameter값과는 상당히 달라질 수 있기 때문에 현재 상태에서의 보정이 의미가 적다고 생각되었다. 대신 본 연구에서는 화성호와 비슷한 특성을 갖는 다른 하구 담수호들의 평균 parameter값을 사용하여 수질을 예측하였다.

통합유역관리시스템의 모의값을 실측값을 이용해 보정한 결과, GIS를 이용해 점오염원을 합리적으로 산정하고, 산정된 점오염원을 유역모델인 HSPF의 입력 자료로 이용하여 하천으로 유입되는 오염부하량을 모의함으로써 보다 합리적인 수질모의가 가능한 것을 확인 할 수 있었다.

2. 하구담수호의 수질예측

보정된 통합유역관리시스템을 이용해 화성지구간척 개발사업이 완료되는 2012년에 대해 화성호의 수질을 예측하였다. 화성호의 수질예측을 위해 다음과 같은 가정을 하였다. 2012년의 인구는 경기도의 평균 인구증가율인 1.5%의 비율로 증가하고, 새로 조성된 간척농지와 계획 중인 2개의 공단을 제외하고는 오염원으로부터 발생하는 부하가 2003년과 동일하다고 가정하였다. 또한 유역 parameter값도 2003년과 동일하고, 2002년(1,232 mm)의 평균강우량이 지난 40년간의 평균값과 비슷하기 때문에 2012년의 기상 자료는 2002년의 값과 동일하다고 가정하였다. WASP 모델이 실측값을 이용해 보정되지 않았기 때문에, 특성이 비슷한 다른 담수호들의 평균 parameter값 (Jung et al., 2004; Yoon and Ham, 2000)을 이용해 담수호의 수질을 예측하였다(Table 1).

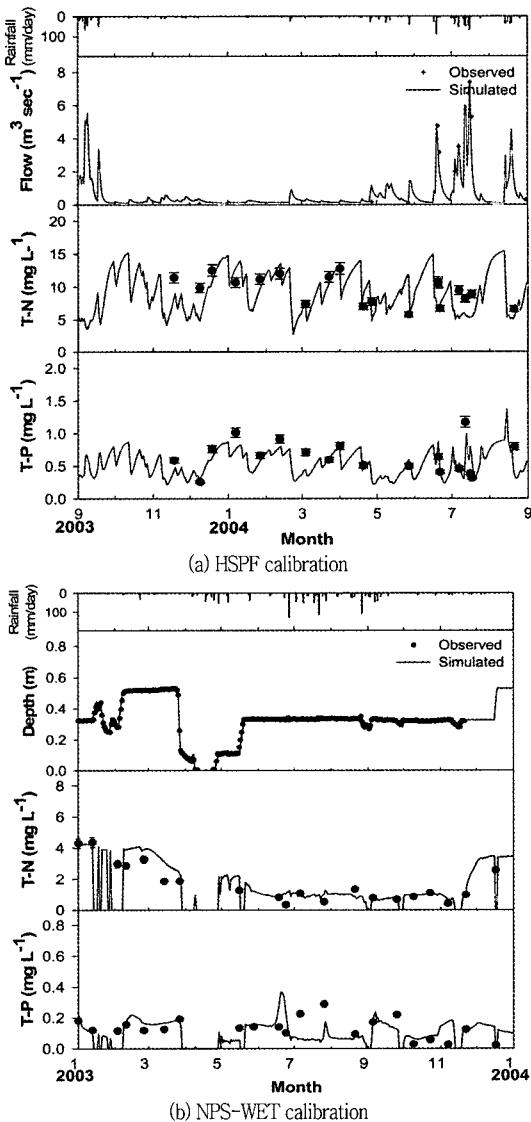


Fig. 4 Calibration of the HSPF and NPS-WET models

Table 1 WASP input parameters from other studies and the model user manual

Parameter code	Unit	WASP manual	Mean ± SD ^a from references	Parameter code	Unit	WASP manual	Mean ± SD from references
K1320C	day ⁻¹	0.09-0.13	0.095 ± 0.0450	IS1	ly day ⁻¹	200-750	367.9 ± 106.77
KNIT	day ⁻¹	2	1.571 ± 0.7319	NCRB	mg N/mg C	0.25	0.196 ± 0.0885
K140C	day ⁻¹	0.09	0.094 ± 0.0548	K71C	day ⁻¹	0.075	0.043 ± 0.0241
KNO3	mg O ₂ /L	0.1	0.136 ± 0.0627	K71T	-	1.08	1.061 ± 0.0268
K1C	day ⁻¹	2	1.669 ± 0.6606	K58C	day ⁻¹	0.22	0.128 ± 0.0925
K1T	-	1.069	1.064 ± 0.0198	K58T	-	1.08	1.067 ± 0.0178
CCHL	mg C/mg Chl-a	30	31.4 ± 8.52				

^a Standard deviation

통합유역관리시스템으로 화성호의 수질을 2012년에 대해 예측한 결과는 Fig. 5와 같다. T-N과 T-P의 평균 농도는 각각 3.97 mg L⁻¹과 0.18 mg L⁻¹로 예측되었으며, 유역에 오염물질 저감을 위한 환경기초 시설을 설치하는 않을 경우 2012년에 화성호는 부영양화가 될 것으로 예측되었다. 화성호의 유역을 Fig. 3과 같이 5개의 소유역으로 분할한 후 오염부하의 공간적인 분포를 분석하였다(Table 2). 화성호로 유입되는 총부하량 중 약 77%의 T-N과 76%의 T-P가 Zone-II, Zone-III 및 Zone-V로부터 배출되었다. 단위면적당 부하량을 비교해보면, Zone-II 지역이 단위면적당 부하량이 0.147 ton T-N ha⁻¹ yr⁻¹과 0.011 ton T-N ha⁻¹ yr⁻¹로 제일 높게 나타났으며, Zone-V지역이 0.123 ton T-N ha⁻¹ yr⁻¹과 0.010 ton T-N ha⁻¹ yr⁻¹로 그 다음으로 많았다. 또한 단위면적당 점오염원 부하는 Zone-II와 Zone-V가 높았으며, 단위

Table 2 Estimated spatial distribution of pollutant loads in the Hwaseong Reservoir in 2012

Zone	Area (ha)	T-N (ton yr ⁻¹)		T-P (ton yr ⁻¹)	
		PS	NPS	PS	NPS
I	3,657	236	85	21	7
II	3,481	312	200	22	18
III	6,269	528	253	39	24
IV	3,186	222	40	19	4
V	5,277	484	165	36	18

면적당 비점오염원 부하는 모든 소유역에서 비슷한 범위를 나타내었다. 단위면적당 점오염원 부하가 높은 Zone-II와 Zone-V지역은 도시화가 많이 진행된 남양동과 조암동이 위치한 소유역이다.

통합유역관리시스템을 이용한 수질예측결과는 주어진 미래의 유역 조건하에서 담수호의 수질을 예측하고, 점오염원과 비점오염원의 공간적인 분포를 분석하는데 유용하였다. 그러나 이상의 예측결과만을 이용해 담수호의 특정 수질기준을 만족시키기 위한 유역의 오염물질저감대책을 수립하는 것은 무리가 있을 수 있다. 미래의 오염원, 기상 및 담수호의 parameter값이 본 연구의 가정과 같을 경우에는 정확하고 합리적일 수 있으나, 실제 미래의 여러 조건들은 본 연구의 가정과 동일하지 않을 가능성이 더 크기 때문에 미래의 수질을 예측함에 있어서 여러 불확실한 요소들을 고려해야 한다. Monte Carlo simulation과 같은 불확실성을 고려한 모델링 기법을 적용할 경우, 이와 같은 문제를 극복할 수 있으며, 보다 합리적인 수질 예측 및 유역관리가 가능하다(Yoon, 1994).

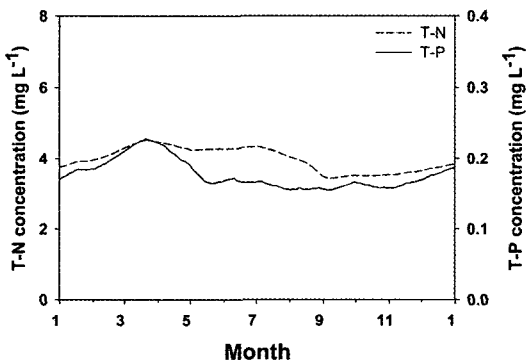


Fig. 5 Predicted Hwaseong Reservoir water quality in 2012

3. 불확실성을 고려한 수질예측

본 연구에서 예측한 2012년의 기상자료 및 점오염원과 WASP 모델의 parameter에 대한 불확실성 분석을 실시한 결과, 3가지의 불확실 요소 중 기상자료의 불확실성이 모델의 결과값에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 점오염원부하 및 WASP parameter의 불확실성 역시 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 기상자료의 불확실성 분석결과 0.8~1.0 범위의 CDF(cumulative distribution function)에 대한 농도변화가 전체 변화량의 약 70%를 차지했다. 즉, 20%의 기상조건하에서 예측되는 수질이 전체 예측된 수질변화량의 70%를 차지할 정도로 크게 영향을 미쳤다. 3가지 불확실 요소가 모두 모델의 결과에 큰 영향을 미치기 때문에, 본 연구에서는 3가지의 불확실한 요소를 모두 고려하여 수질을 예측하였으며 그 결과는 Fig. 6의 combined uncertainty와 같다. 3가지의 불확실요소의 불확실성요소를 모두 고려하여 2012년의 화성호의 수질을 예측한 결과, 유역에 오염물질 저감을 위한 환경기초시설을 설치하는 않을 경우 95%의 신뢰수준하에서 화성호의 평균 T-N과 T-P의 수질은 각각 4.80 mg L^{-1} 과 0.26 mg L^{-1} 보다 작을 것으로 나타났다. 또한 화성호의 평균 T-P 농도가 0.10 mg L^{-1} 를 넘길 확률은 약 96%로 나타났다.

이상의 결과에서와 같이 화성호의 수질예측에 있어서 통합유역관리시스템의 불확실요소는 모델의 결과값에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 통합유역

관리시스템에서 불확실한 모델 입력자료를 이용하여 담수호의 수질을 예측할 경우 유역의 오염물질 저감을 위한 계획을 수립하는 과정에 큰 오류를 범할 수 있을 것으로 생각된다. 그러므로 모델링 결과가 정책 결정을 위한 중요한 수단으로 사용될 경우 반드시 불확실성 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4. 불확실성을 고려한 유역관리 시나리오 평가

이상의 결과에 의하면, 화성호의 수질은 2003년 기준의 오염원처리시설로는 담수호가 부영양화 되는 것을 막을 수 없을 것으로 생각된다. 간척사업이 완료된 후 담수호의 수질이 악화되는 것을 막기 위한 여러 수질개선관리방안 중 2가지의 방안(하수처리장과 인공습지설치)에 대해 화성호의 수질개선 정도를 평가하였다. 하수처리장과 인공습지는 유역의 점오염원과 비점오염원을 제어할 목적으로 유역관리에 많이 사용되는 방안들이다. 소유역별 오염원의 분포를 분석한 결과에 의하면(Table 2), Zone-II와 Zone-V에서 단위면적당 높은 점오염원 부하량이 나타났으며, 또한 도시화가 많이 이루어졌기 때문에 이 지역에 하수종말처리장(WWTP-1 in Zone-II, $15,000 \text{ ton day}^{-1}$; WWTP-2 in Zone-V, $16,000 \text{ ton day}^{-1}$)을 건설하고, 전체 유역에 대해 15개의 소규모 오수처리 시설($<500 \text{ ton day}^{-1}$)을 설치한다고 가정하였다(Fig. 3). 모델링 결과에 의하면 화성호로 유입되는 오염부

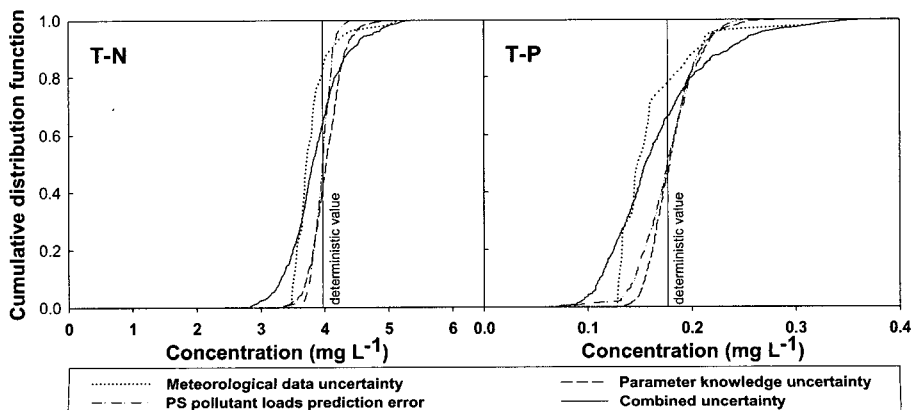


Fig. 6 Cumulative distribution functions in the uncertainty analysis

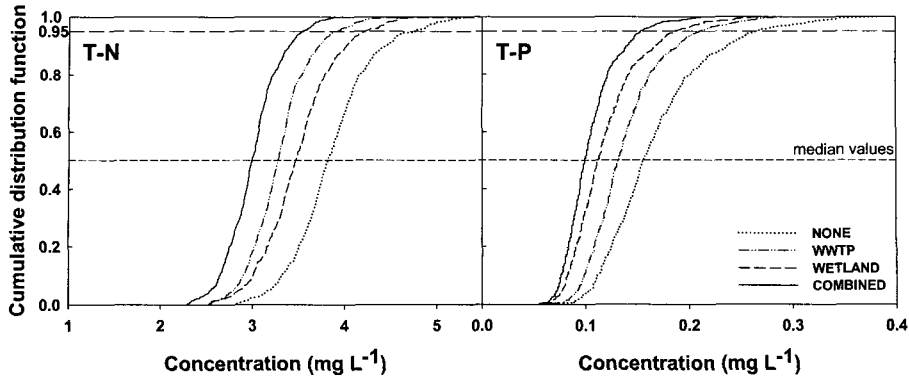


Fig. 7 Cumulative distribution functions for the various watershed management practices

하량의 약 80%가 3개의 하천을 통해 화성호로 유입 되기 때문에, 이를 제어하기 위해 3개 하천의 말단부에 총 264 ha(wetland-1, 65 ha; wetland-2, 102 ha; wetland-3, 97 ha)의 인공습지를 건설한다고 가정하였다(Fig. 3). 본 연구에서는 유역에 오염관리방안을 적용하지 않은 경우(NONE 시나리오), 2개의 하수종말처리장과 15개의 소규모오수처리시설을 적용한 경우(WWTP 시나리오), 3개 하천 말단부에 인공습지를 건설하는 경우(WETLAND 시나리오)와 유역에 하수처리장과 인공습지를 모두 적용하는 경우(COMBINED 시나리오)와 같은 4가지의 시나리오에 대해 통합유역관리시스템을 이용하여 각 시나리오가 담수호의 수질개선에 미치는 영향을 분석하였다(Fig. 7).

Fig. 7에 나타난 바와 같이 WWTP, WETLAND 및 COMBINED 시나리오 모두 담수호의 수질개선에 효과적인 것으로 나타났다. T-N과 T-P의 담수호 수질개선율은 WWTP 시나리오에서 18.8%와 19.2%로 나타났으며, WETLAND 시나리오에서는 11.9%와 26.9%로 나타났다. 화성호의 T-N의 수질개선에는 WWTP 시나리오가 WETLAND 시나리오보다 효과적인 것으로 나타난 반면에, T-P의 수질개선에는 WETLAND 시나리오가 WWTP 시나리오보다 더 효과적인 것으로 나타났다. 전체적으로 WWTP와 WETLAND 시나리오가 결합된 COMBINED 시나리오가 담수호의 수질개선에 가장 효과적인 것으로 나타났다. 화성호의 수질개선을 위해 COMBINED 시나리오를 적용할 경우 화성호의 T-N과 T-P의 수질은 2012년에 95%의 신뢰수준하에서 각각 3.54 mg L^{-1} 와 0.15 mg L^{-1} 이

하로 나타날 것이며, 화성호의 T-N과 T-P의 수질개선율은 각각 26.7%와 42.9%가 될 것으로 예측되었다.

WETLAND 시나리오와 COMBINED 시나리오에서 화성호의 T-P의 수질개선율이 T-N의 수질개선율보다 높게 나타났다. 이는 습지모델(NPS-WET)에서 획득하여 사용한 입력자료들이 조성되고 운영기간이 상대적으로 짧은(5년 이내) 인공습지의 실측된 결과값을 이용해 보정되었기 때문에, 인공습지에 의한 T-P 제거율은 과대평가되었으며, T-N 제거율은 약간 과소평가 된 것으로 생각된다. 일반적으로 시간이 경과함에 따라 인공습지의 T-P 제거율은 습지바닥이 혐기성 상태로 되면서 일부 인성분이 용출되어 감소하며, T-N 제거율은 습지바닥이 혐기성상태가 되고 유기탄소가 풍부해지면서 탈질화가 촉진되어 약간 증가한다(Mitsch and Goeslink, 2000). 이러한 문제는 안정된 상태의 습지 실측자료를 이용해 습지모델을 보정함으로써 보완될 수 있을 것이다.

수질모델링에서 불확실성분석은 다음과 같은 중요한 정보를 제공한다. 첫째, 불확실성분석은 모델을 적용하는 과정동안 언제 어디서 불확실한 요소가 영향을 미치는지 알 수 있도록 함으로써, 불확실성을 제거하기 위한 적절한 방법을 취할 수 있도록 도움을 준다. 둘째, 불확실성의 정량적인 수치를 제공한다. 주어진 누적분포함수(CDF) 또는 확률분포함수(PDF)를 통해 어떤 농도를 초과할 확률과 수질 예측의 신뢰구간을 추정할 수 있다. 셋째, 불확실성 분석은 유역관리자에게 특정한 신뢰수준하에서 원하는 수질농

도를 달성할 수 있도록 유역관리방안 또는 오염물질 저감대책을 수립하는데 도움을 준다.

IV. 요약 및 결론

통합유역관리시스템을 이용해 수질을 모의한 결과 수질 모의값과 실측값이 유사하였으며, 이 시스템은 수질예측과 유역관리를 위한 실질적이고 편리한 도구가 될 수 있을 것으로 판단된다. 보정된 통합유역관리시스템을 이용해 담수호의 수질을 예측한 결과는 주어진 조건하에서 평균 수질을 예측하고, 점오염원과 비점오염원의 공간적 분포를 분석하는데 매우 유용했다. 3가지 불확실 요소에 대해 불확실성 분석을 한 결과 기상자료의 불확실성이 모델의 결과값에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 점오염원 부하 예측의 불확실성과 parameter값의 불확실성 역시 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 유역에 오염물질저감대책 및 유역관리방안을 적용하지 않을 경우, 2012년 화성호의 T-N과 T-P의 수질은 95%의 신뢰수준하에서 4.80 mg L^{-1} 과 0.26 mg L^{-1} 수준이 될 것으로 예측되었다. 하수처리장과 인공습지 건설 시나리오를 분석한 결과, 두 시나리오를 모두 적용한 시나리오가 화성담수호의 수질개선에 가장 효과적인 것으로 나타났다. 하수처리장과 인공습지 건설 시나리오를 모두 적용할 경우 2012년 화성호의 T-N과 T-P의 수질은 95% 신뢰수준하에서 3.54 mg L^{-1} 과 0.15 mg L^{-1} 수준이 될 것이며, 수질개선은 각각 26.7%와 42.9%가 될 것으로 예측되었다. 이상에서와 같이 불확실성을 고려한 통합유역관리시스템은 확률을 기반으로 한 유역관리 방안의 수립 및 평가에 유용하게 사용될 수 있다고 판단되며, 이 분야에 관한 지속적인 연구와 현장적용을 권장한다.

사 사

“이 논문은 2005년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.” (KRF-2005-214-D00413)

References

1. Annan, J. D., 2001, Modelling under uncertainty: Monte Carlo methods for temporally varying parameters, *Ecol. Modelling*, 136, pp.297-302.
2. Beck, M. B., 1987, Water quality modeling: A review of the analysis of uncertainty, *Wat. Resour. Res.*, 23(8), pp.1393-1442.
3. Eckhardt, K., L. Breuer and H. Frede, 2003, Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects, *J. Hydrol.*, 273, pp.164-176.
4. Ham, J. H., 2005, Nonpoint source pollution control using constructed wetlands and integrated watershed modelling, PhD dissertation, Department of Rural Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea.
5. He, C., C. Shi, C. Yang and B. P. Agosti, 2001, A windows-based GIS-AGNPS interface, *Journal of The American Water Resources Association*, 37, pp.395-406.
6. Jung, P. J., H. S. Goh, M. H. Hyun and E. J. Lee, 2004, Water quality management using WASP5 & WASP builder for a basin of an agricultural reservoir, *J. of KSWQ*, 20(5), pp.422-431.
7. Mitsch, W. J. and J. G. Gosselink, 2000, *Wetlands*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA.
8. Somlyódy L. and R. Wets, 1988, Stochastic optimization models for lake eutrophication management, *Oper. Res.*, 36(5), pp.660-681.
9. USEPA, 1997, Compendium of tools for watershed assessment and TMDL development, EPA 841-B-97-006, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., USA.
10. USEPA, 2001, Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources(BASINS) version 3.0 user's manual, EPA 823-8-01-001, Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., USA.

11. Yoon, C. G., 1994, Uncertainty analysis in stream water quality modeling, Ph.D. dissertation, Civil and Environmental Engineering, Rutgers University, New Brunswick, NJ, USA.
12. Yoon, C. G. and J. H. Ham, 2000, Prediction of water quality in estuarine reservoir using SWMM and WASP5, Korean J. of Environ. Eng., 19(3), pp.252-258.