

수리매개변수가 수질예측에 미치는 영향분석

Effect of Hydraulic Parameters on Water Quality Predictions

김상단*, 강두기**, 신현석***

Sangdan Kim, Min Kee Park, Doo Kee Kang, Hyun-Suk Shin

요 지

수문순환과 수질오염과정의 제반 기작들이 완벽하게 규명되지 않은 상황에서 인위적 또는 자연적 조건에 따른 수질의 평가는 수질모형으로서 추정하는 것이 유일한 대안이며, 다양한 관리대안에 따른 수질환경변화를 예측함으로써 합리적인 관리방안을 도출하는데 유용한 수단이 되고 있다. 현재 시행 중인 수질오염총량관리제에서 또한 수질모형은 핵심적인 역할을 담당하고 있으며, 보다 구체적으로는 단위유역의 목표수질을 결정하는 것에서부터 기본계획 또는 시행계획에 따른 오염부하량 등 환경요인의 변화와 이에 따른 목표수질 설정지점의 수질 변화 등을 모의하는데 이용되고 있다. 그러나 모형에 사용되는 입력 매개변수의 불확실성과 이에 관련된 수질 모형 자체의 불확실성은 수질오염총량관리제와 같이 많은 이해당사자가 관여된 정책의 결정 시에는 공학적으로 많은 부담으로 작용하고 있는 것 또한 현실이다. 실제로 미국의 오염총량관리제의 경우를 살펴보면 모형의 불확실성 분석이 전체 과정의 진행에서 가장 핵심적인 지위를 차지하고 있다고 볼 수 있다. 많은 연구들이 수질모형에 있어서의 불확실성을 정량화하기 위하여 수행되어 왔으며, 특히 미국의 오염총량관리계획의 수립 시에는 이러한 불확실성 분석을 토대로 하여 안전율을 산정하도록 되어있다. 그러나 이러한 연구들의 대부분은 수질모형의 매개변수 중 수질기작에 관련된 매개변수들(예를 들어, DO, BOD, N, P 등에 대한 반응계수)에 대한 연구에 집중되어 있다. 하천의 수질을 적절하게 모델링하기 위해서는 이러한 수질에 직접적으로 관련된 매개변수들 이외에 하천의 수리특성에 관한 올바른 이해를 바탕으로 그와 관련된 수리학적 매개변수들에 대한 연구가 뒷받침되어야 한다. 그동안 수행되어온 수질 모델링의 적용 사례를 살펴본 바에 따르면 하천을 모델링하기 위해서는 현장 특성 자료의 중요성, 특히 하천수리특성에 관련된 기초 자료의 가용성 여부가 모형의 성패에 매우 중요한 역할을 함을 알 수 있다. 이는 유량, 유속 및 폭과 깊이로 대변되는 하천 지형은 물질 이송에 대한 주요 외력 함수이며, 다른 모든 예측치들은 이들에 의존적일 수밖에 없기 때문이다. 따라서 이들의 정확한 표현은 올바른 수질 예측에 있어서 필수적일 수밖에 없다. 많은 모형 매개변수들이 유속과 깊이에 의존적이거나, 이들에 관한 정보는 종종 현장관측에서 조차 무시되는 경우가 많다. 이에 본 연구에서는 수질모형의 매개변수 중 특히 수리특성에 관련된 매개변수들이 수질에 미치는 영향을 파악하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 적용된 수질모형은 QualKo를 사용하였으며, 대상 하천은 낙동강 본류 경남구간 시점 부근인 회천 합류 전부터 낙동강 본류 경남구간 종점 부근인 밀양강 합류 전까지의 경남 오염총량관리 기본계획 시 구축된 모형 매개변수를 바탕으로 분석을 수행하였다. 일차오차분석을 이용하여 수리매개변수와 수질매개변수의 수질항목별 상대적 기여도를 파악해 본 결과, 수리매개변수는 DO, BOD, 유기질소, 유기인 모든 항목에 일정 정도의 상대적 기여도를 가지고 있는 것을 알 수 있었다. 이로부터 수질 모형의 적용 시 수리 매개변수 또한 수질 매개변수의 추정 시와 같이 보다 세심한 주의를 기울여 추정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 불확실성, 수리특성, 수질모형

* 정희원 · 부경대학교 환경시스템공학부 전임강사 + E-mail : skim@pknu.ac.kr

** 정희원 · 부산대학교 토목공학과 박사과정 + E-mail : dookee1@naver.com

*** 정희원 · 부산대학교 토목공학과 부교수 + E-mail : hsshin@pusan.ac.kr

1. 서론

수질모형은 수학적으로 표현되지 않고 단지 개념적인 표현들로 나타낼 수밖에 없는 부분이 많으므로 자연현상을 그대로 재현한다는 것은 현재의 과학기술로는 거의 불가능하다. 인위적 조건에 따른 수질의 변화를 평가하기 위해서는 자연조건에 따라 지속적으로 관측하여야 가능하므로 경제적으로 유익하지 않고 자연조건이 계속하여 변동하므로 그 결과 또한 일정하지 않아 결과를 평가하기가 용이하지도 않다. 수문순환과 수질 오염과정의 제반 기작들이 완벽하게 규명되지 않은 상황에서 인위적 또는 자연적 조건에 따른 수질의 평가는 수질모형으로서 추정하는 것이 유일한 대안이며, 다양한 관리대안에 따른 수질환경변화를 예측함으로써 합리적인 관리방안을 도출하는데 유용한 수단이다. 현재 시행 중인 수질오염총량관리제에서 또한 수질모형은 핵심적인 역할을 담당하고 있으며, 보다 구체적으로는 단위유역의 목표수질을 결정하는 것에서부터 기본계획 또는 시행계획에 따른 오염부하량 등 환경요인의 변화와 이에 따른 목표수질 설정지점의 수질 변화 등을 모의하는데 이용되고 있다. 그러나 모형에 사용되는 입력 매개변수의 불확실성과 이에 관련된 수질 모형 자체의 불확실성은 수질오염총량관리제와 같이 많은 이해당사자가 관여된 정책의 결정 시에는 공학적으로 많은 부담으로 작용하고 있다. 실제로 미국의 오염총량관리제의 경우를 살펴보면 모형의 불확실성 분석이 전체 과정의 진행에서 가장 핵심적인 지위를 차지하고 있다고 볼 수 있다(National Research Council, 2001). 모형 관련 기술의 발달로 실제와 보다 근접한 결과를 산출하게 되었으나, 자연현상을 정확하게 표현하는 것에는 여전히 한계가 있으며, 이에 여러 가지 이유가 있을 수 있겠으나 특히 자연현상과 인간 활동의 무작위성에 의한 시스템의 변화로 인하여 발생하는 불확실성은 현재의 모형 기술로는 해결하기 어려운 것인 사실이다.

일차오차분석(first order error analysis) 개념을 이용하여 하천수질의 농도변화에 관계하는 인자들의 상대적인 기여도를 분석한 Burges와 Lettenmaier (1975)를 비롯하여 이 후 많은 연구들이 수질모형에 있어서의 불확실성을 정량화하기 위하여 수행되어 왔다. 범용모형인 QUAL2E-UNCAS 모형의 경우에는 모형 자체적으로 민감도 해석, 일차오차해석, 몬테카를로 모의 해석 등을 수행하는 불확실성 분석 모듈을 가지고 있는 경우도 있으며, 미국의 오염총량관리계획의 수립 시에는 이러한 불확실성 분석을 토대로 하여 안전율을 산정하도록 되어있다. 이러한 연구들의 대부분은 수질모형의 매개변수 중 수질기작에 관련된 매개변수들(예를 들어, DO, BOD, N, P 등에 대한 반응계수)에 대한 연구에 집중되어 있다. 하천의 수질을 적절하게 모델링하기 위해서는 이러한 수질에 직접적으로 관련한 매개변수들 이외에 하천의 수리특성에 관한 올바른 이해를 바탕으로 그와 관련된 수리학적 매개변수들에 대한 연구가 뒷받침되어야 한다. 그동안 수행되어온 수질 모델링의 적용 사례를 살펴본 바에 따르면 하천을 모델링하기 위해서는 현장 특성 자료의 중요성, 특히 하천수리특성에 관련된 기초 자료의 가용성 여부가 모형의 성패에 매우 중요한 역할을 함을 알 수 있다(Barnwell 등, 2004). 유량, 유속 및 폭과 깊이로 대변되는 하천 지형은 물질 이송에 대한 주요 외력 함수이며, 다른 모든 예측치들은 이들에 의존적일 수밖에 없다. 따라서 이들의 정확한 표현은 올바른 수질 예측에 있어서 필수적이다. 많은 모형 매개변수들이 유속과 깊이에 의존적이거나, 이들에 관한 정보는 종종 현장관측에서 조차 무시되는 경우가 많다. 이에 본 연구에서는 수질모형의 매개변수 중 특히 수리특성에 관련된 매개변수들이 수질에 미치는 영향을 파악하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 적용된 수질모형은 QualKo를 사용하였으며, 대상 하천은 낙동강 본류 경남구간 시점 부근인 회천 합류 전부터 낙동강 본류 경남구간 종점 부근인 밀양강 합류 전까지의 경남 오염총량관리 기본계획 시 구축된 모형 매개변수를 바탕으로 분석을 수행하였다.

2. 일차오차분석

본 연구에서 사용된 일차오차분석 기법에 대한 간략한 설명은 아래와 같다. 일차오차분석은 종속변수인 수질 농도에 영향을 미치는 각각의 반응 기작들의 종류와 이러한 요인들이 각 수질에 미치는 영향력을 정량화하여 출현 농도의 표준편차를 계산하는 기법이다. 이 때 분석의 용이성을 위하여 각각의 입력변수들이 서로 독립적이고 이러한 독립변수들과 종속변수가 선형으로 작용한다는 가정 하에 Taylor 다항식 중 일차미분항에 근거하여 독립변수에 대한 종속변수의 변화량을 산출하게 된다. 결과적으로 일차오차분석을 통하여 오염물질 농도에 영향을 미치는 주요 인자 사이의 상대적인 기여도를 파악할 수 있게 된다. 일차오차분석을 식으로 표

현할 경우 아래와 같다.

$$Y = g(X) + \sum_{i=1}^P (x_i - x_{ic})(\partial g / \partial x_i)_X \quad (1)$$

여기서 Y 는 모형 g 의 최종 결과 값, X 는 입력 매개변수 벡터, P 는 입력 변수 x 의 수, x_{ic} 는 모형에서 입력 매개변수 x_i 에 해당하는 입력 값이다. 모형에서 기대될 수 있는 거동이 기대되는 매개변수의 값을 사용한 모형의 거동과 동일하다고 가정하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$E[Y] = g(X_m)$$

여기서 X_m 은 모형의 입력 값으로 이루어진 매개변수 벡터이다. 기본 변수들 사이에 서로 독립이라 가정하면 Y 의 분산은 아래와 같이 표현된다.

$$Var(Y) = \sigma_y^2 = \sum_{i=1}^P [(\partial g / \partial x_i)_{X_m} \sigma_i]^2 \quad (2)$$

여기서 σ_y 는 Y 의 표준 편차, σ_i 는 입력변수 x_i 의 표준 편차이다. 일차오차분석을 이용한 불확실성 분석의 절차는 아래와 같다.

- 불확실성 분석을 시행할 모형의 주요 매개변수의 결정
- 유한차분방법을 이용한 편미분 계산
- 각각의 매개변수에 대한 변동계수 산정
- 각각의 매개변수들의 결과에 대한 상대적 기여도 계산

본 연구에서 모형의 결과는 전체적인 경향성을 파악하기 위하여 어떤 특정 지점에서의 수질이 아닌 전체 수역의 평균적인 수질을 대상으로 한다.

3. 적용

적용된 수질모형은 QualKo를 사용하였으며, 대상 하천은 낙동강 본류 경남구간 시점 부근인 회천 합류 전부터 낙동강 본류 경남구간 종점 부근인 밀양강 합류 전까지(그림 1)의 경남 오염총량관리 기본계획 시 구축된 모형 매개변수를 바탕으로 분석을 수행하였다. 분석에 이용된 모형의 주요 매개변수의 추정값과 그에 대한 변동계수는 표 1과 같다. 표 1에서 수질관련 매개변수들의 변동계수는 Brown과 Barnwell(1987)에서 제안하고 있는 최대 변동계수를 적용하였으며, 수리관련 매개변수는 최소 변동계수를 적용하였다. 일차오차분석을 이용한 불확실성 분석을 할 때, 수질 자료의 변화량을 산정하기 위해서 매개변수의 값을 5%씩 증가시켜 모형 결과를 도출한 후, 유한차분방법을 이용하여 변화량을 계산하였다. 일차오차분석 시에 5%의 증분을 이용하는 예는 이미 QUAL2E-UNCAS 모형에서 불확실성 분석을 수행 시에 적용된 바 있다. 이를 통하여 계산된 각각의 주요 매개변수들의 수질 항목별 상대적 기여도는 표 2와 같다.

이 때, 최종적인 상대적 기여도의 계산 시 수리관련 매개변수 b와 d의 경우에는 각각의 값들이 서로 밀접하게 관련되어 있으므로 이를 독립으로 가정하기 어려움에 따라 이를 고려하여 그 기여도를 다시 1/2로 낮추어 계산하였다. 산정 결과 DO의 경우에는 수리 매개변수가 차지하는 상대적 기여도와 수질 매개변수가 차지하는 상대적 기여도가 거의 같은 수준으로 계산되었으며, BOD의 경우에는 수리 매개변수가 차지하는 상대적 기여도가 11%, 유기질소의 경우에는 26%, 유기인의 경우에는 8% 정도이다. 이로부터 모형의 적용 시 수리 매개변수 또한 수질 매개변수의 추정 시와 같이 보다 세심한 주의를 기울여 추정할 필요가 있음을 알 수 있다. 한 가지 주목할 점은 수리 매개변수는 수질항목에 무관하게 10%정도의 상대적 기여도를 가지고 있다는 것이다. K_1 , K_3 의 경우에는 주로 DO나 BOD에 중요한 영향을 끼치는 반면에 유기물질 항목에는 거의 미미한 상대적 기여도를 보여주고 있으며, β_3 , β_4 의 경우에는 유기물질 항목에는 매우 큰 영향력을 가지고 있으나 반대로 DO나 BOD에는 그다지 큰 영향이 없는 반면에, 수리 매개변수는 이들 모두에 일정정도의 상대적 기여도를 가지고 있음을 알 수 있다.

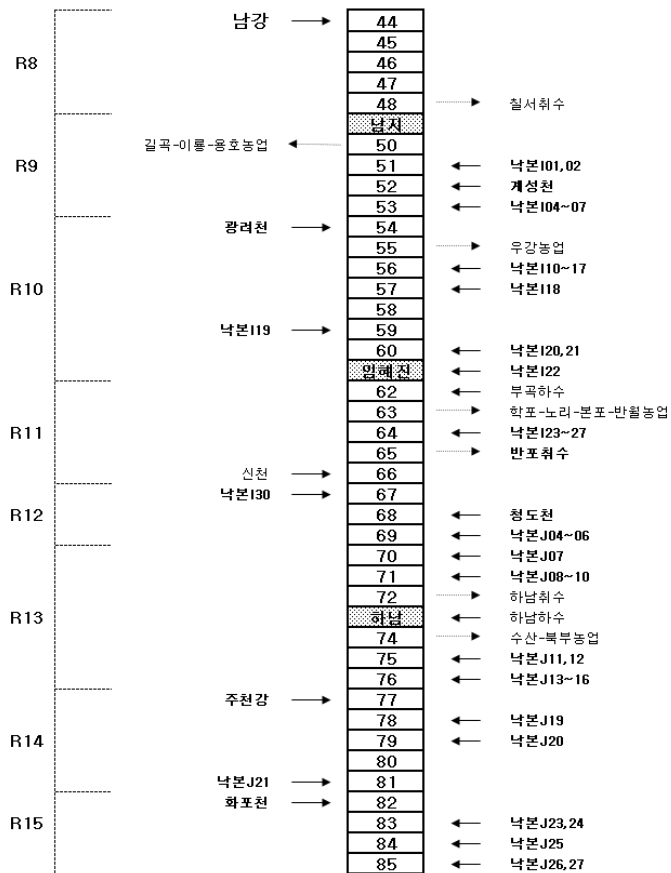
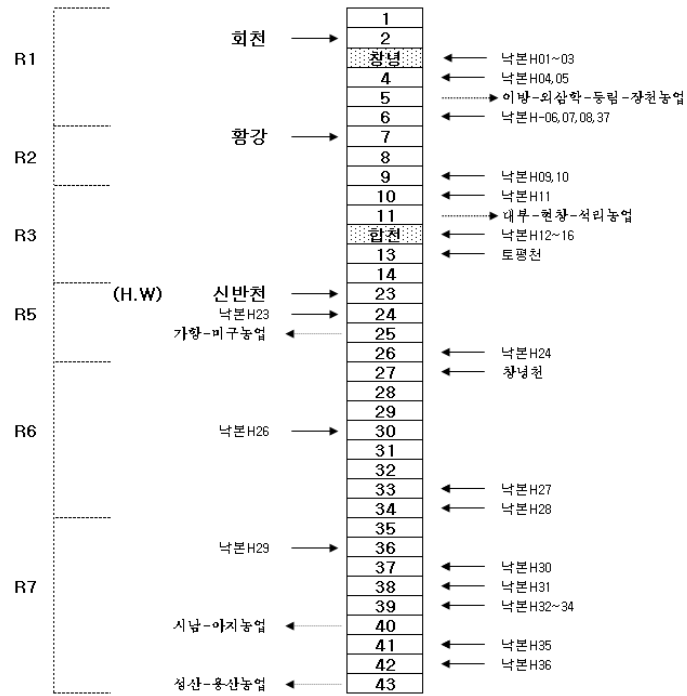


그림 1. QualKo 모형의 모식도

표 1. 분석에 이용된 주요 매개변수

매개변수	설명	추정값	변동계수
b	유량-유속 관계의 매개변수 ($V = a \cdot Q^b$)	Reach마다 다름	5%
d	유량-수심 관계의 매개변수 ($D = c \cdot Q^d$)	Reach마다 다름	5%
K_1	탈산소계수	0.08	25%
K_3	BOD 침강계수	0.10	25%
β_3	유기질소 반응속도상수	0.02	25%
β_4	유기인 반응속도상수	0.10	25%

표 2. 수질항목별 매개변수들의 상대적 기여도 (%)

매개변수	DO	BOD	유기질소	유기인
b	45.406	1.677	10.113	6.047
d	0.124	9.699	15.946	1.710
수리계수 소계	45.530	11.376	26.058	7.757
K_1	43.989	44.462	0.000	0.000
K_3	5.518	37.526	0.000	0.000
β_3	0.076	6.492	73.742	0.000
β_4	4.888	0.144	0.020	92.243
수질계수 소계	54.470	88.624	73.942	92.243
계	100	100	100	100

4. 결론

일차오차분석을 이용하여 수리매개변수와 수질매개변수의 수질항목별 상대적 기여도를 파악해 보았다. 분석 결과 수리매개변수는 DO, BOD, 유기질소, 유기인 모든 항목에 일정 정도의 상대적 기여도를 가지고 있는 것을 알 수 있었다. 이로부터 모형의 적용 시 수리 매개변수 또한 수질 매개변수의 추정 시와 같이 보다 세심한 주의를 기울여 추정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- Barnwell, T.O., Brown, L.C. and Whittemore, R.C (2004) Importance of field data in stream water quality modeling using QUAL2E-UNCAS, J. Environ. Engr., 130, pp. 643-647.
- Brown, L.C and Barnwell, T.O. (1987) The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Document and user manual, Rep. No. EPA 600/3-87/007, Athens, Ga.
- Burges, S.J. and Lettenmaier, D.P. (1975) Probabilistic methods in stream quality management, Water Resours. Bull., 11, ppp. 115-130.
- Natinal Research Council (2001) Assessing the TMDL approach to water quality management, National Academy Press, Washington, D.C.