

총설

수질자료의 불확실성이 수질관리에 미치는 영향

김건하[†]

한남대학교 공과대학 토목환경공학과

Impacts of Uncertainty of Water Quality Data on Water Quality Management

Kim, Geonha[†]

Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University

(Received 11 January 2006, Accepted 15 February 2006)

Abstract

Uncertainty is one of the key issues of the water quality management. Uncertainty occurs in the course of all water quality management stages including monitoring, modeling, and regulation enforcement. To reduce uncertainties of water quality monitoring, manualized monitoring methodology should be developed and implemented. In addition, long-term monitoring is essential for acquiring reliable water quality data which enables best water quality management. For the water quality management in the watershed scale, fate of pollutant including its generation, transport and impact should be considered while regarding each stage of water quality management as an unit process. Uncertainties of each stage of water quality management should be treated properly to prevent error propagation transferred to the next stage of management for successful achievement of water quality conservation.

keywords : Management, Modeling, Monitoring, Uncertainty, Water quality

1. 서론

수질에 영향을 미치는 인자는 매우 많으며 이러한 영향 인자는 서로 복잡하게 반응하여 수질을 해석하는 것을 어렵게 한다. 시료의 채취, 농도분석 및 농도자료의 해석 등 수질관리의 여러 단계에서 우리가 알지 못하는 인자가 수질자료에 포함되며 이를 불확실성(uncertainty)이라고 일컫는다.

수질관리와 관련하여 불확실성을 유발할 수 있는 요인으로는 시료채취기술, 분석속련도, 분석방법, 시료채취 주기, 모델링, 자료 변환 등을 들 수 있다. 검출한계 이하의 자료 또한 불확실성을 유발한다. 수질자료를 이용하여 모델링을 실시하는 경우에도 불확실성이 발생할 수 있는데 대부분 자료의 부족과 해석오차에서 발생한다(Gosh et al., 2006).

불확실성이 많이 내포된 자료를 이용하여 오염원을 규제할 때 오류를 유발할 수 있다. 수질관리에 불확실성을 고려한 예로 미국의 TMDL(Total Maximum Daily Load)은 대상 유역내 점원오염부하와 비점원오염부하의 합이며 여기에 불확실성을 고려하기 위하여 전체부하의 5-10%를 안전 여유분(MOS: Margin of Safety)으로 두게 된다. 미 환경청에서는 점원방류수 규제법인 NPDES(National Pollutant Discharge Elimination System) 프로그램에서 방류수의 변동을 고려하도록 되어 있으나 여전히 부정확한 자료를 사

용하고 있으며, 따라서 오염원이나 규제기관에 많은 불확실성을 유발하고 있다(USEPA, 2001). 우리나라의 오염총량제에서도 이러한 불확실성을 고려하도록 되어있으나 구체적인 논의는 아직 없는 것 같다.

Oenema 등(2003)은 수질자료의 불확실성은 자료의 치우침(bias)과 오차(error)에서 발생한다고 하였으며 그 원인으로 다음과 같은 항목을 들었다. Bias의 원인으로는 1) 개인 간 능력과 지식의 차이; 2) 시료채취; 3) 분석; 4) 자료의 가공; 5) 거짓자료 등이 있으며 오차의 원인으로는 시료채취 오차와 측정오차가 있다고 하였다. 수질자료를 획득하는 장소와 시간이 그 자료를 이용하여 수립한 규제를 적용하는 장소 및 시간과 다르다는 점은 불확실성을 유발하는데 이를 근본적 불확실성(fundamental uncertainty)이라 하고, 적용하는 과정에서 발생할 수 있는 불확실성, 즉 자료나 지식의 부족, 수집한 자료와 적용할 자료 구조가 다른 것은 운전상의 불확실성(operational uncertainty)으로 분류하기도 한다.

본 논문에서는 수질관리와 관련된 불확실성을 수질자료, 수질모델링으로 나누어 살펴보고, 불확실성을 정량화하는 기법을 고찰하였으며 수질관리에 있어서 불확실성을 저감할 수 있는 대책을 살펴보았다.

2. 수질자료와 관련된 불확실성

수질자료의 불확실성은 시료채취부터 발생되기 시작한다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
kimgh@hannam.ac.kr

예를 들면 하천수의 수질은 하천 깊이별, 위치별, 시간별로 매우 다른 값을 나타내는데 잘 짜여진 모니터링 계획을 이용하면 불확실성을 상당히 저감시킬 수 있으므로 정형화된 시료채취 방법의 모니터링 계획의 수립이 매우 필요하다. 오염총량제의 실행을 위하여 대대적으로 실시될 수질 모니터링을 위하여 모니터링 방법, 시료채취방법, 시료 보관방법에 관한 매뉴얼을 작성하고 이에 대한 훈련과정을 설치하는 등의 적극적인 대처가 필요하다.

수질분석과 관련한 불확실성 요소는 (1) 불완전한 자료 (2) 다른 시료채취 방법, 분석방법 또는 다른 시간과 장소로 인한 오차, (3) 환경자체의 시간, 공간 변화에 의한 차이, (4) 체계적이지 않은 시료채취 계획으로 인한 대표성 없는 자료, (5) 한정된 정보로 인한 해석오차 등이다.

수질 항목에 따라 분석의 난이도가 다르다. 많은 경우 수질기준으로 삼는 생화학적으로구량(BOD: Biological Oxygen Demand)은 미생물이 수중에 용해되어 있는 오염물질을 기질로하여 5일동안 생장할때 필요한 용존 산소의 양을 측정한다. 그러나 BOD로 나타낼 수 있는 오염물질의 형태가 한정되어 있고 미생물의 배양과정을 거치므로 분석에 영향을 미치는 인자가 매우 많아서 실험의 정확도(accuracy) 및 정밀도(precision)가 모두 낮다. BOD 실험의 방법은 간단한 편이지만 BOD 10.0 mg/L 이하의 낮은 농도의 자료는 분석 오차를 유발할 수 있는 소지가 많다. 특히 하천수 수질의 1등급~3등급을 판별하는 기준의 범위인 1.0-3.0 mg/L에서는 0.1 mg/L 정도의 정밀도를 갖는 실험이 어렵다고 생각한다.

하나의 예를 더 들자면 하천의 수질 측정항목 중에서 총대장균 농도의 분석을 살펴보면 시료의 채취와 미생물의 배양과정을 포함하는 점에서 BOD와 유사하다. 그러나 BOD의 경우 10 mg/L 이하의 경우 시료의 회석이 없이 직접 분석할 수 있는데 비하여 대장균의 경우에는 수심배에서 수백배의 회석이 필요하므로 오차의 발생가능성이 훨씬 크다.

수질분석에서 발생하는 오차는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$M - T = B + Z \quad (1)$$

M = 측정값; T = 정확한 분석값; B = 분석의 방법과 관련된 일관성 있는 오차; Z = 분석에서 단계별 발생할 수 있는 무작위적인 오차이다. 일관성있는 오차 (B)는 분석의 숙련도 또는 동일시료를 다른 분석기관에서 분석하는 등의 노력을 통하여 감소시킬 수 있다. 무작위적인 오차 (Z)는 동일한 시료를 반복적으로 분석하므로써 줄일 수 있으나 중복시료의 갯수가 12개 이상이 되면 중복시료로 인한 발생오차 감소분이 거의 일정하게 된다. 많은 경우에 3개의 동일시료를 분석하는데 이는 시료갯수가 3개일때 오차감소가 최대이므로 비용과 효과를 비교할때 가장 효율적인 분석이 될 수 있기 때문이다(APHA et al., 1998).

이러한 불확실성이 있는 상태의 수질자료를 해석함에 있어서 오염물질의 발생경향은 매우 중요하다. 즉 신뢰할 수

있는 수질자료를 확보하기 위하여 지속적인 모니터링을 실시할 필요가 있는 것이다.

3. 수질모델링과 관련되는 불확실성

여러 수질예측 모델은 자연현상을 묘사하는 기본원리에 기초하여 구성된 수리함수에 포함된 독립변수에 일정한 값을 주고 이 값에 따른 종속변수의 일정한 결과값(deterministic value)을 산출하는 결정론적 모델(deterministic model)이 대부분이다. 결정론적 모델의 발달로 실제와 좀 더 근접한 결과를 산출할 수 있게 되었으나, 이러한 모델만으로 자연현상을 정확하게 표현하는 데에는 한계가 있으며 그 이유는 크게 다음 몇가지로 설명할 수 있다. 1) 환경을 분석하는 과정에서 시스템을 잘못 이해하거나 불안정하게 묘사하기 때문에 생기는 오차, 2) 반응과정을 수학적으로 단순화하는 과정에서 생기는 수학적 오차, 3) 모델 매개변수나 입력변수를 선택하는 과정에서 생기는 오차, 4) 자연현상과 인간활동의 무작위성에 의한 시스템의 변화로 생기는 오차 등이다. 이들 오차중 4)를 제외한 나머지의 경우 모델 개발자와 사용자의 전문지식으로 극복이 가능하나 자연의 무작위성은 결정론적 모델로 표현이 불가능하다.

수질 관리 실무에서 여러 경험식을 사용하는 경우가 있는데, 이러한 경험식은 실제로 적용하는 지역의 자료와 거리가 있는 경우가 있다. 수질관리에 있어서 가장 빈번하게 사용하는 모델은 원단위라 할 수 있다. 그러나 간단하고 적용이 용이하다는 장점에 반하여 원단위는 다음과 같은 단점이 있다: 1) 비정상 유출현상- 원단위로는 단기적인 홍수유출로 인한 유출부하의 비정상성이나 장기적인 기후조건 변화에 따른 유출부하의 변동을 나타낼 수 없다; 2) 식종구성의 다양성- 식종은 그 지역의 자연기후, 토양층 등 다양한 인자의 영향을 받게되고 따라서 유출부하에 많은 영향을 미치지만 원단위로 표현할 수 없다; 3) 지역구성요소의 다양성- 유역의 물질순환은 지형, 지질, 토양, 기후 등의 영향을 지대하게 받게 된다. 그러나 같은 유역내에서 유출부하량은 많은 차이를 보일 수 있다. 원단위 적용으로 인한 오차를 방지하기 위하여는 장기간에 걸친 모니터링이 필요하다. 이러한 경우 상당한 불확실성이 발생하게 되는데, 이러한 경우 불확실성을 저감하기 위하여 경험식을 적용되는 지역의 자료를 이용한 Bayesian법을 이용하여 수정한다(Zhang et al., 2004a).

정확한 모델링을 위하여 정확한 자료를 모델에 입력하여야 한다. 이러한 입력자료는 정확도의 순으로 보면 (1) 대상지역 직접 측정, (2) 기존 자료로부터의 추정, (3) 모델 보정, (4) 문헌자료 이다. 특히 온도는 여러 반응계수에 직접적인 영향을 미치므로 정확한 자료를 입력하여야 한다(Barnwell et al., 2004).

수질모델링에 있어서 불확실성을 도입한 예는 국내외에 다수 있다. 김 등(2002)은 수질관리모형을 개발하면서 수질예측값에 영향을 많이 미치는 인자를 민감도 분석을 이용하여 선정하고 낙동강의 두 지점에 대하여 수질모형을 사

용한 수질예측값의 빈도 분포를 1차 오차해석(First Order Error Analysis)과 Monte Carlo기법을 이용하여 제시하였다. De Blois 등(2003)은 라인강의 수질예측모델인 RHIMO (RHIne Model)을 개발하면서 수질예측에서 발생하는 불확실성에 대하여 분석하였다. 그는 강우유출, 저니침전, 저니 부상, 오염물질 이송 등 지표수 수질 모델링의 불확실성에 있어서 저니의 침적 및 부상이 미치는 영향이 크다는 것을 강조하였으며 특히 정확한 오염원자료의 입력이 수질모델링의 불확실성을 저감하는데 직접적으로 영향을 미친다고 하였다.

수질예측 모형인 QUAL2E-UNCAS에는 불확실성 분석의 기능이 있으며 수질 관리에 이를 이용한 사례가 있다(박 등, 1993; Barnwell et al., 2004). 그러나 QUAL2E-UNCAS는 불확실성 분석이 가능한 하천 지점수가 최대 5개 지점으로 한정되어 있어 오염부하량 분석시 하류에서 나타나는 예측 수질 신뢰구간을 전 하천거리에 걸쳐 제시하지 못하는 단점이 있다(박 등, 1993).

4. 불확실성의 정량화

여러 비모수(non-parametric), 모수(parametric)방법을 통하여 신뢰구간을 계산할 수 있다. 모니터링 자료를 평가할 때 우선 정규성 분포를 검정하고 비모수분석을 실시할지 모수분석을 실시할지를 결정하여야 한다. 많은 경우에 수질 모니터링 자료는 정규분포(Poisson distribution)를 따르지 않으므로 비모수 분석을 실시할 필요가 있으나(김 등, 2005), 정규분포를 따르는 경우에는 모수분석이 좀 더 정확한 것으로 알려지고 있다(Berthouex et al., 1994). 많은 경우 자료를 로그 변환하여 모수분석을 실시하는데, 이때 분석에 오차가 발생하며 이에 대한 고려를 할 필요가 있다. 비모수 분석을 이용하여 신뢰구간을 계산할 경우에는 자료수가 충분하여야 한다. 95% 신뢰구간 계산을 위하여 자료의 수는 20개가 필요하며 99% 신뢰구간을 위하여는 적어도 100개의 자료가 필요하다(Berthouex et al., 1994).

불확실성을 정량화하는 가장 간편한 방법은 표준편차를 중간값으로 나눈 변동계수(CV: coefficient of variation)를 제시하는 것이다. 이와 더불어 신뢰구간(confidence interval), 표준오차(standard error)도 불확실성을 정량화할 때 사용한다. 불확실성을 정량화하기 위한 방법으로 민감도 분석(sensitivity analysis), 1차 오차해석(first order error analysis), Monte Carlo모의(Monte Carlo Simulation) 등 세 가지 방법이 주로 사용된다. 민감도 분석은 가장 보편적인 오차해석 기법으로서 모형의 변수를 하나씩 변동시킴에 따라 결과값의 진동폭을 관찰하여 불확실도의 변화 양상을 검정하는 방법이다. 모형 입력변수 변화에 상응하는 모형 출력의 변화는 모형의 민감도를 나타낸다. 그러나 민감도 분석은 여러 입력변수의 변화에 따른 모델 출력의 변화양상을 알 수 없다.

1차 오차해석은 여러 입력변수의 변화에 따른 모델출력의 변화를 파악할 수 있다는 점에서 민감도 분석에 비하여

크게 개선된 방법이다. 1차 오차해석은 모형을 기술하는 미분방정식을 Taylor 급수에 의하여 확장하고, 선형항을 절단하는 과정으로 구성된다. 그러나 모형이 미분방정식으로 표현되어야 하고 여러 개의 미분방정식으로 모형이 구성되어 있는 경우에는 적용하기 힘들다.

Monte Carlo모의에서는 불확실한 매개변수가 통계학적 분포로 정의된다. 모델의 중요한 인자는 하나의 값이 아닌 범위의 값으로 규정되며 이에 대한 모델의 출력값은 여러 차례의 반복 수행을 통하여 역시 분포형이 된다. 모형결과 불확실성이 각 반복계산과정에 대하여 미리 규정된 분포형으로부터 임의로 선정된 불확실한 모형 입력을 사용하여 확장론적 모형의 시뮬레이션을 수백번 수행함으로써 결정된다. 충분한 반복계산이 수행되었다면 임의의 지점 및 시간에 대한 모형 결과치의 빈도분포가 제시될 수 있다. 반복기법에 의하여 요구되는 정확도를 도출하기에 충분한 반복계산의 수를 결정할 수 있다.

재표본 및 추계학적 모의(Resampling and stochastic simulation)을 이용하여 불확실성을 정량화하는 방법도 있다. Bootstrap법은 재표본 방법중 하나로써 표본자료의 확률을 추정하여 재표본을 실시하고 재표본 자료를 이용하여 표본자료 이외의 자료를 생성하는 기법이다. 이러한 재표본 방법은 표본자료가 정규분포를 따르지 않을때도 사용할 수 있으나, 적용이 복잡하다는 단점이 있다.

5. 수질관리에 있어서 불확실성에 대한 대책

불확실성이 높은 수질자료를 이용하여 오염원을 규제하면 법 적용의 실효성이 저감된다. 계절적인 영향, 수자원 장기 운용계획, 강수량과 하천유량의 변화등 장기적인 유역 특성의 변화 또한 수질관리의 불확실성이 증가하는 원인이 된다(Werrity, 2002). 유역관리에 있어서 이러한 불확실성을 저감하기 위하여 Freedman 등(2004)은 TMDL(Total Maximum Daily Load)의 과정을 연결된 단위공정으로 간주하는 개념을 제시하였다. 이 방법은 Walters 등(1990)이 제시한 adaptive watershed management를 발전시킨 방법으로 규제를 실시할 지역에 비점원등으로 인하여 불확실이 많이 내포되어 있을 때 불확실성이 내포되어 있는 상태로 규제를 우선 실시하고 규제하는 과정에서 불확실성을 제거하는 개념이다(Fig. 1 참조). 각 단계별로 불확실성을 최소화하기 위한 노력을 할 필요가 있는데 이러한 불확실성은 다음 단계에서도 그대로 전이되어 불확실성이 더 커지는 오차 전파(Error Propagation) 과정을 거치게 되므로 수질관리의 각 단계별로 불확실성을 관리하는 노력이 필요하다. 이와 같은 규제의 우선 적용과 수정은 미 환경청의 병원균과 퇴적물의 TMDL규제를 위한 방법(USEPA, 2001; USEPA, 1999)에서도 언급되어 있는데 불확실성이 높은 상태에서 규제를 실시하고 적용중에 자료가 확보되면 수정하는 것이다.

이와 같이 유역단위의 수질관리에 있어서 오염물질의 발생(generation)-이송(transport)-영향(impact)을 모니터링하고

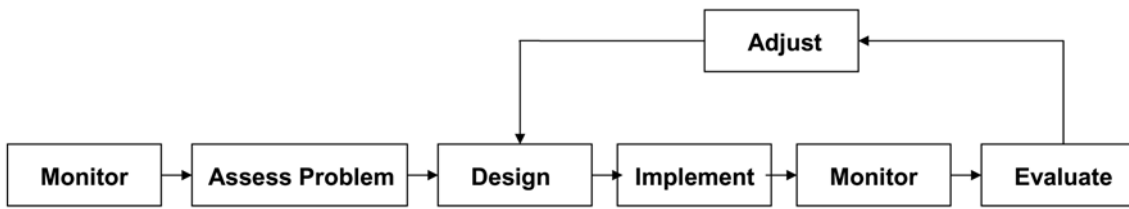


Fig. 1. Concept of adaptive water quality management.

그 오염물질을 저감하는 장치 또는 계획을 실천함에 있어서 단계별로 공정의 개념을 도입하는 것이 필요하다고 생각하며 자료를 체계적으로 관리하여 불확실성을 저감하는 노력이 필요하다.

6. 요약 및 결론

수질관리에 있어서 불확실성은 수질 모니터링, 모델링, 오염원 규제 등 전 과정에 걸쳐서 발생한다. 수질관리를 위하여 필요한 신뢰할 수 있는 수질자료를 확보하기 위하여 지속적인 모니터링을 실시할 필요가 있으며 모니터링에서 발생하는 불확실성을 저감하기 위하여 모니터링 방법에 관한 매뉴얼을 작성하여 산학연에 걸쳐 일관된 방법으로 시행하는 것이 필요하다. 유역규모의 수질관리에 있어서 공정의 개념을 도입하는 것이 필요하며 각 단계별로 불확실성을 최소화 할 수 있도록 관리하여 신뢰할 수 있는 오염원 규제 행정을 전개하여야 할 것이다.

참고문헌

- 김미아, 이수용, 이재관, 이정섭, 탐진강 수질측정 지점간 동질성 검정을 위한 비모수적 자료분석, *한국물환경학회지*, **21**(6), pp. 651-658 (2005).
- 김상호, 한건연, 김원, 최홍식, 신뢰도 해석기법을 이용한 2차원 수질관리모형의 개발, *한국수자원학회 논문집*, **35**(5), pp. 463-474 (2002).
- 박석순, 최은주, 하천 불확실성 분석을 위한 몬테카를로 시뮬레이션과 일차함수 오차분석 비교, *한국물환경학회지*, **9**(3), pp. 153-158 (1993).
- APHA, AWWA, WEF, WPCF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 18th ed.*, Amer. Public Health Assoc., Washington, D.C. (1998).
- Barnwell, T. O., Brown, L. C. and Whitemore, R. C., Importance of Field Data in Stream Water Quality Modeling using QUAL2E-UNCAS, *Journal of Environmental Engineering*, **130**(6), pp. 643-647 (2004).
- Berthouex, P. M. and Brown, L. C., *Statistics for Environment Engineers*, Lewis Publishers, Boca Raton, New York, p. 335 (1994).
- Cothern, C. R. and Ross, N. P., *Environmental Statistics, Assessment, and Forecasting*, Lewis Publications, Boca Raton, Ann Arbor, p. 418 (1994).
- De Blois, C. J., Wind, H. G., de Kok, J. L. and Koppeschaar, K., Robustness of River Basin Water Quality Models, *Journal of Water Resources Planning and Management*, **129**(3), pp. 189-199 (2003).
- Freedman, P. L., Nemura, A. D., and Dilks, D. W., Viewing Total Maximum Daily Loads as a Process, not a Singular value: Adaptive Watershed Management, *Journal of Environmental Engineering*, **130**(6), pp. 695-702 (2004).
- Frey, H. C. and Burnmaster, D. E., Methods for Characterizing Variability and Uncertainty: Comparison of Bootstrap Simulation and Likelihood-based Approaches, *Risk Analysis*, **19**(1), pp. 109-130 (1999).
- Ghosh, S. and Mujumdar, P. P., Risk Minimization in Water Quality Control Problems of a River System, *Advances in Water Resources*, **29**(3), pp. 458-470 (2006).
- Melching, C. S. and Bauwens, W., Uncertainty in Coupled Nonpoint Source and Stream Water-quality Models, *Journal of Water Resources Planning and Management*, **127**(6), pp. 403-413 (2001).
- Oenema, O., Kros, H. and de Vries, W., Approaches and Uncertainties in Nutrient Budgets: Implications for Nutrient Management and Environmental Policies, *European Journal of Agronomy*, **20**, pp. 3-16 (2003).
- USEPA, *Protocol for Developing Pathogen TMDLs: First Edition*, EPA 841-R-00-002, US Environmental Protection Agency, Washington (2001).
- USEPA, *Protocol for Developing Sediment TMDLs: First Edition*, EPA 941-B-99-004, US Environmental Protection Agency, Washington, p. 4 (1999).
- USEPA, *Technical Support Document for Water Quality-based Toxic Control*, EPA/502/2-90-001, US Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC, p. 335 (1990).
- Walters, C. J. and Holling, C. S., Large-scale Management Experiments and Learning by Doing, *Ecology*, **71**, pp. 2060-2068 (1990).
- Werrity, A., Living with Uncertainty: Climate Change, River Flows and Water Resource Management in Scotland, *The Science of the Total Environment*, **294**(2002), pp. 29-40 (2002).
- Zhang, H. X. and Yu, S. L., Applying the First Order Error Analysis in Determining the Margin of Safety for Total Maximum Daily Load Computations, *Journal of Environmental Engineering*, **130**(6), pp. 664-673 (2004a).
- Zhang, L., Tang, W., Zhang, L. and Zheng, J., Reducing Uncertainty of Prediction from Empirical Correlations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **130**(5), pp. 526-534 (2004b).