〈學術세미나要約〉

降雨－流出模型에 관한 狀態 및 媒介變數의 推計學的 推定

Stochastic Estimation of System States and Parameters for Rainfall-Runoff Model

鄭 東 國*

서 론

현재까지 국내의 홍수량산정 및 예측업무는 수집된 자료집단을 이용한 변수추정(Off-Line Parameter Estimation)에 의하여 시행되고 있는 단계로 강우－유출 현상의 다양성을 충족시키지 못하고 있으며, 특히 강우예측의 불확실성에 의한 홍수예측의 정도가 낮으므로 예측기간(Forecasting Lead Time)의 제약이 따르게 된다. 이러한 문제점들을 보완하기 위하여 최근 외국에서는 강우－유출 모형에 여러가지 순환추정 알고리즘(Recursive Estimation Algorithm)을 적용한 홍수량 산정 또는 변수추정에 관한 많은 연구가 행해지고 있다. 그리고 주어진 모형에 대한 구조의 식별 및 변수추정등은 적절한 모형의 설정만큼 중요한 역할을 하고 댐을 포함하고 있는 유역에서는 홍수추적모형에 의하여 예측된 저수지 유입량에 의한 단기 저수지운영에도 영향을 미친다. 더구나, 강우－유출 모형을 사용하여 실시간 홍수예측을 수행하는 경우에는 수시로 수집되는 최신 자료로써 적응 변수추정(Adaptive Parameter Estimation)을 하고 이를 토대로 정도 높은 홍수예측을 하여야 하는 문제도 최적화에 의한 변수추정은 매우 중요하다.

최적화 기법을 적용한 변수 추정방법으로는 크게 3가지로 분류할 수 있다. 즉 확률적인 기법으로 Bayesian추정, 최우법(Maximum Likelihood, ML)등이 있고 간접적인 기법으로 최소자승(Least Squares, LS)추청 및 제어방법(Control Method)에 있으며 직접적인 기법으로 대수학적 추정등이 있다. 확률적인 기법에 의한 강우·유출 모형의 변수추정방법으로는 Bayesian추정과 ML방법등이 있고 특히 Bayesian 추정에는 선형모형에 대한 Kalman Filter(KF) 및 비선형모형에 대한 Extended KF(EKF) 알고리즘과 같은 MAP(Maximum a Posterior)추정을 이용한 경우가 대부분이다. 간접적인 기법에 의한 변수추정의 최적화에 관한 연구로는 최소자승 추정에 의한 것이 대부분이다.

본 연구에서는 최근의 연구를 기초로 하여 매시간 입력되는 자료를 사용한 실시간 홍수예측(On-Line Real-Time Forecasting)에 관한 연구로서 특히, 모형의 추계학적 현상(Stochastic Phenomena)을 고려한 강우－유출모형의 상태 및 변수의 동시추정에 관한 시스템을 구성한다. 시스템 구조의 식별(Structure Identification) 및 변수추정(Parameter Estimation)을 통하여 홍수량 산정의 정도를 높이고, 국내의 중소유역을 선택하여 적용한 상태 및 변수의 동시 추정에 의한 결과를 분석하는데 그 목적을 둔다.

홍수추적모형의 수립

홍수추정모형의 유역추적은 유효강우에 의한 지표수유출과 침투된 강우에 의한 지하수유출로 구성한다. 지표수유출에 기여하는 유효강우와 지하수유출에 기여하는 침투된 강우는 침투량의

* 한남대학교 토목공학과

산정을 통하여 결정한다. 그리고 침투된 강우가 모두 유출에 기여하는 것으로 가정하고 저류함수법에 의한 지역화(Regionalization)된 매개변수를 사용하여 유효강우를 산정한다. 산정된 지표수유입량에 따른 지표수유출에 대하여 선형하도와 선형저수지의 복합모형과 지체효과를 고려한 n개의 선형 저수지모형 및 n개의 비선형 저수지모형을 검토한다. n개의 비선형저수지에 대한 시스템방정식을 저류량을 상태로하여 상태·공간모형으로 구성한다. 유효강우의 산정에 따라 침투된 강우량에 의한 지하수유출은 지표수유출해석과 같은 방법을 검토한다. 하도추적모형도 유역추적모형과 같이 n개의 비선형저수지모형을 적용한다.

본 연구에서는 홍수추적모형으로 일반적인 n개의 비선형 저수지모형을 선정하여 상태-공간모형을 적용한 비선형 동적시스템 방정식(Nonlinear Dynamic System Equation)과 관측방정식(Observation Equstion)으로 구성한다.

변수추정모형의 구성

잔차의 자기상관과 분산의 변화(Heteroscedasity)에 관한 문제는 변수 최적화기법으로 GLS를 사용하여 해결할 수 있다. 특히 이와같은 GLS를 상태·공간 모형에 적용한 알고리즘으로 Prediction Error Method(PEM)를 얻는다. 그리고 매개변수를 미지의 확률변수로 보고 실측치와 매개변수에 대한 통계적인 모형을 구성할 수 있는 경우에 추정오차의 손실함수를 최소화하는 Bayesian추정을 적용할 수 있다. MAP추정의 대표적인 방법으로는 변수 및 공분산의 사전치를 이용하여 선형 상태·공간모형에 적용하는 최적화기법으로는 Kalman Filter (KF)가 있다. 그리고 비선형 상태·공간 모형에 적용하기 위하여 비선형 상태벡타를 Taylor 급수로 전개하여 이를 KF에 사용하면 Extended Kalman Filter(EKF) 알고리즘이 된다.

두 알고리즘을 비교하면 EKF는 상태변수와 매개변수의 비선형관계를 확대(extended)상태·공간 모형을 사용하여 상태 및 매개변수를 추정하고 PEM은 매개변수의 주계학적 거동에 의한 상태변수의 추정오차를 산정하여 매개변수를 추정하고 상태변수를 결정한다. PEM에 의한 상태 및 매개변수의 추정은 형렬과 벡타의 경사를 구하는 계산과정이 복잡하므로 확대상태·공간모형을 사용하여 상태 및 변수의 비선형 모형에 일반적으로 적용하는 Iterated EKF에 의하여 홍수추적모형과 상호연계하여 상태 및 변수추정을 실시한다. IEKF추정에서는 시스템방정식에서 비선형 전달함수를 기준 상태벡타에 전개하여 전달함수의 Jacobian형렬을 영향계수(Influence Coefficient)방법에 의하여 계산할 수 있으며 상태는 선형궤적(Linear Trajectory)의 투영치(Projection Point)로 매시간 순환적으로 개선할 수 있다.

실제유역에의 적용결과

변수추정에서는 유역의 매개변수 및 유역과 하도 추적모형의 비선형 저수지 갯수과 지체효과 변수는 모의발생으로 추정하여 고정변수로 하고 비선형 저수지의 저류계수는 상태 및 매개변수의 동시추정에 의하여 산정한다. 홍수추적모형의 매개변수추정을 위하여 해석적인 민감도방정식을 사용한다. 추정변수의 공분산행렬과 상관행렬을 이용하여 분산이 큰 변수는 민감도가 낮으므로 변수추정의 수렴도가 낮고 작은 변수는 민감한 변수이므로 수렴도가 빠른 특성을 이용한다. 그리고 상관행렬의 값을 이용하여 요소의 값이 클수록 변수사이의 상관성이 높은 특성을 이용한다. 따라서 민감도 분석의 결과에 의하여 유역추적모형과 하도추적모형을 균등 비선형저수지로 단순화하여 상태 및 변수추정모형에 관한 시스템방정식을 재구성한다. 상태 및 변수추정모형을 IEKF 알고리즘을 사용하여 실제유역에 적용하 본 결과, 상태 및 변수의 동시 추정에 의하여 홍수예측업무의 정도를 높일 수 있음을 알 수 있다. 추정변수값들의 시간의 증가에 따라 수문곡선의 증감에 따라 변화함을 고찰하였다.

본 연구와 관련하여 보다 정확한 홍수량 산정 및 효율적인 수자원의 관리 운용을 위해서는 예

361면으로 계속→

인 수질측정이 이루어져야 하겠다. 이러한 점을 고려하여 선정된 수질측정시기가 그림 5에 제시되어 있다.

4) 새로운 수질측정망에 대한 평가

획득된 정보의 질과 정보획득에 소요된 비용으로 부터 수질측정망의 전반적인 효율성이 결정된다. 최적의 설계는 최소의 수질측정비용으로 소기의 목적을 달성할 수 있도록 수질측정망을 설계하는 것이다. 새로 설계된 수질측정망은 기존의 수질측정망과 다음과 같은 차이점을 갖고 있다.

● 수질측정지점 : 기존의 4개의 수질측정지점으로 구성된 기본수질측정망은 비점오염원으로부터의 오염물질 유입지점과 부하량을 평가하기에 미흡하다. 앞에서 정의했던 목표(가)를 달성하기 위해서는 최소 둘(Li18, Li19) 또는 최대 5개 측정지점(Li18, Li19, Li21, B05, M06)이 추가되어야 한다.

마찬가지로 목표(나)를 위해서는 Mjolby바로 상류지점(M04)에 또 하나의 측정지점이 추가되어야한다. 새롭게 선정된 측정지점들은 점오염원과 비점오염원의 비교를 더욱 용이하게 할 것이다(목표(다).

● 측정항목의 선택 : 수질측정망 운용목표에 부합되도록 측정항목을 결정해야한다. 기존의 20여개의 항목에서 단지 6개의 항목(유량, TSS, TP, PO_4-P, NO_3-N, Pb)으로 줄였다. 측정항목의 선별적인 축소는 비용과 시간의 절약을 통하여 보다 효율적인 수질조사가 이루어 질 수 있도록 할 것이다.

● 측정빈도 : 측정빈도는 기존의 연간 6내지 12회에서 13회로 증가되었다. 측정빈도를 유출과 오염발생시기를 고려하여 이원화하였다. 계절적인 변화요인들을 고려하여 오염발생과 유출이 많은 시기에 집중적인 수질측정이 이루어지도록 하였다.

참고로, 여기에 소개된 컴퓨터화된 기법은 IBM-PC AT/XT 호환기종인 개인용컴퓨터(DOS version 3.1이상, 초소 256K 메모리)에서 사용할 수 있도록 개발되었다.

참 고 문 헌

Horner, R.R., Mar, B.W., Reinelt, R.E., Richey, J.S. and Lee, J.M. 1986. *Design of monitoring programs for determination of ecological change resulting from nonpoint source water pollution in Washington State.* Final Report, Washington State Department of Ecology, Olympia, WA., U.S.A.

Mar, B.W., Lettenmaier, D.P., Horner, R.R., Richey, J.S., Palmer, R.N., Millard, S.P., MacKenzie, M.C., and Lund, J.R. 1986. *Sampling design for aquatic ecological monitoring. Final Report,* Project No. RP1729-1, electric Power Research Institute, vol 1-5, Palo alto, CA., U.S.A.

Reinelt, R.E., Castensson, R., and Horner, R.R. 1987. *Modification of an existing monitoring program to address nonpoint source polluting.* Vatten 43:199-208.

→ 410면에서 계속

측기간의 제약에 따른 홍수량예측의 정도를 높이기 위하여 상태 및 변수의 초기추정과 시스템 및 관측잡음에 의한 상태와 변수의 추기공분산추정에 대하여 강우·유출모형의 추계학적 특성에 관한 연구와 강우예측모형과의 결합을 통하여 모형의 적용성을 높일 수 있는 연구가 추가되어야 한다. 그리고 저수지추적을 포함한 저수지 운영모형과 연계시켜 홍수시 실시간 저수지 운반방안을 통하여 수자원의 효과적인 관리와 운영을 할수 있는 연구가 필요하다.