

多目的 貯水池 流入量의 豫測模型

A Development of Inflow Forecasting Models for Multi-Purpose Reservoir

沈 淳輔* · 金 萬植** · 韓 在錫***

Abstract

The purpose of this study is to develop dynamic-stochastic models that can forecast the inflow into reservoir during low/drought periods and flood periods.

For the formulation of the models, the discrete transfer function is utilized to construct the deterministic characteristics, and the ARIMA model is utilized to construct the stochastic characteristics of residuals.

The stochastic variations and structures of time series on hydrological data are examined by employing the auto/cross covariance function and auto/ cross correlation function. Also, general modeling processes and forecasting method are used the model building methods of Box and Jenkins.

For the verifications and applications of the developed models, the Chungju multi-purpose reservoir which is located in the South Han river systems is selected. Input data required are the current and past reservoir inflow and Yungchun water levels. In order to transform the water level at Yungchun into streamflows, the water level-streamflows rating curves at low /drought periods and flood periods are estimated. The models are calibrated with the flood periods of 1988 and 1989 and hourly data for 1990 flood are analyzed. Also, for the low/drought periods, daily data of 1988 and 1989 are calibrated, and daily data for 1989 are analyzed.

* 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수, 기술사/수자원·수질연구센터 소장

** 충북대학교 수자원·수질연구센터 연구원(공학석사)

*** 충북대학교 수자원·수질연구센터 선임연구원(공학박사)

I. 序 論

댐 및 저수지의 최적운영을 포함한 수자원개발 및 관리측면에서 수리·수문학적 특성과 자연적, 지리적 특성에 의해 하천 수계내의 유출량이 시간 및 공간에 따라 극심하게 동적인 변화를 보이므로 많은 어려움이 있다. 다목적댐 저수지를 홍수기 및 비홍수기에 효율적으로 운영하기 위해 선결되어야 할 필수적인 과제로 저수지 유입량의 정확한 예측이다.

추계학적, 동적 변동특성을 갖는 유입량의 정확한 예측은 축적된 수문자료를 토대로 실시간 적용할 수 있는 예측모형을 개발하여 활용함으로써 정확도를 향상시킬 수 있다. 따라서, 저수지 수문 조작을 최적으로 하게하여 댐의 안정을 도모함과 동시에 방류에 따른 하류의 홍수조절 효과를 극대화 시키기 위해서는 홍수기 및 비홍수기에 저수지 유입지점에서의 유입량을 정확히 예측할 수 있는 모형개발이 절실하다.

이와같은 연구의 필요성에 따라 본 연구의 목적은 저수지 유입지점 상류에 위치해 있는 T/M 수위 및 우량국으로 부더의 수문자료를 사용하여 시변성과 임의성이 강한 홍수기, 비홍수기인 평수, 갈수기에 저수지 유입량을 정확히 예측할 수 있는 동적-추계학적 모형을 개발하고자 한다. 그리고, 홍수기의 유출발생은 시간변화에 따른 동적특성이 강하므로 본 연구에서는 모형화 기법으로서 추계학적 기법을 활용하고, 수문자료로서 홍수기에는 시간별 유출자료를, 비홍수기에는 일별 유출자료를 사용하였다.

연구방법으로서, 저수지 유입량을 예측하기 위한 모형을 개발하고자 시간에 따라 변화하는 관측된 수문자료에 대한 입력과 출력간의 동적 변환시스템으로 이산화된 전이함수 모형을 적용하여 모형에 대한 동정(Identification), 추정(Estimation), 검증(Verification)과정을 통해 확정론적 성분모형을 개발하였다. 또한, 잔차(residuals)에 ARIMA 모형을 적용하여 임의오차성분모형을 구성하여 확정론적 성분모형에 조합시킴으로서 유입량 예측을 위한 모형을 개발하였다.

II. 貯水池 流入量 豫測을 위한 基本理論

1. 確定論的成分 模型

이산화된 동적선형계에서 입력치를 X_t , 출력치를 Y_t 라고 할때 과거의 입력치와 출력치가 여과(filtering) 과정에서 동일하다는 가정하에 이산화된, 동적 전이함수모형에 대한 기본식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y_t = v_0 X_t + v_1 X_{t-1} + v_2 X_{t-2} + \dots$$

$$\begin{aligned}
 &= (v_0 + v_1 B_1 + v_2 B_2 + \dots) X_{t-b} \\
 &= V(B)X_{t-b}
 \end{aligned} \tag{1}$$

전이함수의 특징은 충격응답함수의 가중치(weight) V_0, V_1, V_2, \dots 에 의해 결정된다. 식(1)에서 이론적으로 무한히 많은 수의 계수들을 포함하는 전이함수 $V(B)$ 는 추정하기 곤란하므로 과거의 입력치와 출력치의 수치가 여과과정에서 동일한 선형모형이라고 가정하고 $V(B)$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(B) = \delta^{-1}(B)\omega(B)B^b \tag{2}$$

따라서, 식(1)과 식(2)를 합성하면 확정론적 성분모형을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Y_t &= \delta^{-1}(B)\omega(B)B^b X_t \\
 &= \delta^{-1}(B)\omega(B)X_{t-b}
 \end{aligned} \tag{3}$$

2. 任意誤差成分 模型

전이함수모형 식(3)에 의해 추정치가 정확하다고 하더라도 출력치 Y_t 에 대해 완전히 예측하지 못한 여러 잔차(disturbance or noise) N_t 가 발생할 수 있으므로 잔차성분 N_t 를 고려하여 식(3)을 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$Y_t = \delta^{-1}(B)\omega(B)X_{t-b} + N_t \tag{4}$$

이때, N_t 와 입력치 X_t 는 상호독립이라 가정하고, N_t 는 자기상관 되어있다고 가정한다면 식(4)에 의해 구해진 잔차로부터 확정되는 임의오차성분모형을 구할 수 있으므로, 이 잔차항을 ARIMA(p, d, q)과정으로 표현할 수 있다면 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N_t = \phi^{-1}(B)\nabla^d \theta(B)a_t \tag{5}$$

3. 豫測技法

유입량의 예측방법으로 차분식으로 표현되는 최소평균제곱오차(minimum mean square errors:MMSE)예측방법을 사용하였다. 이 방법은 확률변수분포에 대한 기술적 예측치를 논하는 한 방법으로 어떤 확률변수의 기대치는 그 변수가 취할 수 있는 값들을 이들 각각의 값에 대응하는 확률로 곱한 값의 합으로 표현할 수 있으므로 식(3)과 (5)를 합하여 차분형태로 변형시키면 식(6)과 같다.

$$P(B)\delta(B)Y_t = P(B)\omega(B)X_{t-b} + \delta(B)\theta(B)a_t \quad (6)$$

계산과정을 단순화 하기 위해서 식(7)과 같이 대치하여 시간 t 에서 조건부 기대치를 생각하고 MMSE 예측방법을 적용하여 l 시간 앞의 예측을 행하면 최종예측식은 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$P(B)\delta(B) = \delta^*(B), \quad P(B)\omega(B) = \omega^*(B), \quad \delta(B)\theta(B) = \theta^*(B) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \hat{Y}_t(l) = [Y_{t+l}] &= \delta^*_{l+1}[Y_{t+l-1}] + \cdots + \delta^*_{p+l}[Y_{t+l-p-r}] \\ &+ \omega^*_0[X_{t+l-b}] - \cdots - \omega^*_{p+l}[X_{t+l-b-p-r}] + [a_{t+l}] \\ &- \theta^*_{l+1}[a_{t+l-1}] - \cdots - \theta^*_{q+l}[a_{t+l-q-r}] \end{aligned} \quad (8)$$

Ⅲ. 流入量 豫測模型의 開發

1. 豫測模型

전이함수를 이용한 확정론적 성분모형인 식(3)과 ARIMA 모형을 이용한 임의오차성분모형인 식(5)에 의해 최종 완성된 동적-추계학적 모형은 식(9)과 같이 표현할 수 있고, 차분식으로 표현되는 이식은 교차공분산을 갖는 특성으로 부터 입력치 X_t 와 출력치 Y_t 간의 변화량과 수계의 물리적 특성에 따라 변형시킬 수 있다.

$$Y_t = \delta^{-1}(B)\omega(B)X_{t-b} + \phi^{-1}(B)\nabla^d\theta(B)a_t \quad (9)$$

2. 模型의 同定化

모형의 동정은 자기공분산함수 및 자기상관함수(ACF), 교차공분산함수, 교차상관함수를 이용하여 전이함수 모형을 동정화하기 위한 첫단계는 입력치 X_t 가 추계학적인 구조를 가진 경우 백색잡음으로 변환시키기 위해서 사전백색화(prewhitening)시켜야 한다. 그리고 이와같은 과정을 거친 새로운 자료 X_t 와 Y_t 를 가지고 교차공분산함수와 교차상관함수를 구한 후, 이들로 부터 매개변수 결정에 필요한 충격응답함수 V_k 를 산정하였다.

ARIMA 모형의 사용에 있어서 가장 중요한 차수의 추정방법은 자기상관함수 및 편자기상관함수 등과 같은 통계분석을 활용하여 차수를 추정하였다. 정상화된 X_t 에 대한 자기상관함수를 산정하여 AR-MA 모형의 모수를 결정하는데 AR 형으로 표현될 수 있는 시계열의 자기상관함수는 차분방정식으로 구할 수 있고, 차수를 대입하면 Yule-Walker 방정식 형태로 표현할 수 있다.

3. 母數의 推定

일단 모형의 계수 및 차수가 초기결정되면 이 모형이 가지고 있는 모수를 현재까지 관측된 자료를 통해 추정하여야 한다. 전이함수로 구성되는 확정론적성분 모형에 대한 모수추정을 위해 매개변수 δ_0 는 $r > 0$ 일때 $A\delta_0 = H$ 로서 결정되고,

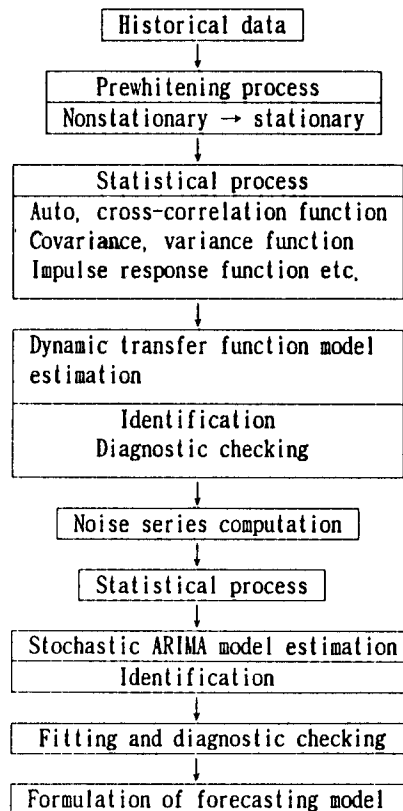
$$\text{여기서, } A = A_{ij} = \begin{cases} v_{b+s+i-j} & s+i \geq j \\ 0 & s+i < j \end{cases}$$

4. 模型의 檢定

본 연구에서는 모형의 정확성에 대한 정도를 검정하는 방법으로서 Kitanidis 와 Bras 에 의해서 연구된 효율기준 R_u^2 을 사용하였다.

IV. 電算 알고리즘 構成

저수지 유입량 예측을 위한 모형의 해석과 제 계산을 위한 전산 알고리즘을 다음과 같이 구성하였다.



V. 適用 및 考察

1. 적용대상 저수지의 수문개황

홍수기 및 비홍수기의 저수지 유입량을 예측하기 위한 모델을 개발하기 위해 충주 다목적 저수지를 선정하였다.

2. 水文資料 分析

모형의 형성이론과 통계학적인 원리를 이용하여 영춘지점의 T/M 국으로 부터 측정된 수위자료를 이용하여 댐 Intake 지점에서의 유입량을 예측하기 위해 수문자료를 분석하였다.

영춘지점 유량자료의 부족으로 영춘지점에 대한 수위-유량 관계곡선을 산정하기 위해 1984년 7월 - 10월, 1985년 3 - 12 월, 1986년 3 - 12 월, 1987년 3 - 11월, 1988년 2 - 11월에 대한 영춘지점의 일별수위 및 유량자료중 일관성 있는 자료를 선택하여 홍수기($2.01 \leq H$)와 비홍수기($2.01 > H$)로 나누어 여러 형태로 분석한 결과 수위 - 유량 관계곡선식은 식을 구하였다. 유입량모형의 동적 및 추정을 위한 수문자료는 비홍수기인 1988년 1월 1일 - 6월 29일, 1988년 9월 10일 - 1989년 3월 10일의 수문자료를 일별자료로, 홍수기인 1988년 7월 13일 05:00 - 7월 19일 02:00, 1988년 7월 19일 08:00 - 7월 28일 11:00, 1989년 7월 24일 08:00 - 8월 2일 11:00 의 수문자료에 대한 1시간 간격의 영춘지점의 수위를 수위-유량 관계곡선식을 이용하여 유량으로 환산한 후, 이와 함께 저수지 유입량 관측자료를 이용하여 동적-추계학적 예측모형의 매개변수를 추정하였다.

3. 模型의 同定 및 推定

상류지역의 유량에 의해 저수지 유입량에 가장 큰 영향을 줄것으로 간주하여, 댐상류의 T/M국이 설치되어 있는 영춘지점에서의 유량자료를 입력치 X_t , 저수지 유입량을 Y_t 라 하여 분석하였고, 상관함수를 구하고 각각의 성질에 따라 사전백색화 과정을 거친 다음, 이들 자료로 부터 구한 구간별 교차상관함수와 그에 대응하는 충격반응변수를 구했다. 이로부터 확률론적모형의 매개변수 $\delta_1, \delta_2, \omega_0, \omega_1, \omega_2$ 에 대한 추정치를 홍수기 및 비홍수기에 따라 구하였다. 홍수기 및 비홍수기에 충주 다목적 저수지 유입량의 예측을 위한 동적-추계학적 모형은 다음식과 같이 구성할 수 있었고, 이에 대한 결정계수는 0.98 이상으로 분석되었다.

$$Y_t = \frac{(0.387 - 0.039B^1 - 0.057B^2)}{(1 - 0.454B^1 - 0.228B^2)} \cdot X_{t-4} + \frac{1}{(1 - 0.582B^1 - 0.215B^2)} a_t \quad (\text{홍수기})$$

$$Y_t = \frac{(1.060 + 0.416B^1 + 0.320B^2)}{(1 - 0.368B^1 - 0.338B^2)} \cdot X_{t-4} + \frac{1}{(1 - 0.648B^1 + 0.029B^2)} a_t \quad (\text{비홍수기})$$

4. 豫測模型式의 開發 및 檢定

홍수기와 비홍수기의 총주 다목적 저수지 유입량 예측을 위한 동적-추계학적 모형식을 이용하여 MMSE(minimum mean square error)방법 식(8)에 적용하면 다음과 같이 홍수기와 비홍수기에 따라 각각 유입량 예측모형식을 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{Y}_t = & 1.036*Y_{t-1} + 0.179*Y_{t-2} - 0.230*Y_{t-3} - 0.049*Y_{t-4} \\ & + 0.387*X_{t+1} - 0.186*X_{t+1-1} - 0.019*X_{t+1-2} - 0.059*X_{t+1-3} \\ & - 0.019*X_{t+1-4} - 0.454*a_{t-1} - 0.228*a_{t-2} \quad (\text{홍수기}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{Y}_t = & 1.016*Y_{t-1} + 0.071*Y_{t-2} - 0.208*Y_{t-3} - 0.010*Y_{t-4} \\ & + 1.060*X_{t+1} - 1.103*X_{t+1-1} - 0.020*X_{t+1-2} - 0.195*X_{t+1-3} \\ & - 0.009*X_{t+1-4} - 0.368*a_{t-1} - 0.338*a_{t-2} \quad (\text{비홍수기}) \end{aligned}$$

예측식을 검증하기 위해 홍수기인 1990년 9월 8일 01:00 - 9월 16일 13:00 까지 1 시간 간격의 자료와 비홍수기인 1989년 11월 22일 - 12월 31일 까지의 일별자료에 적용하여 본 결과 결정계수 R^2 는 아래 도표에 나타난 바와 같이 높게 나타났다. 그러나 이러한 결과에 대해 좀더 정확성을 가하기 위해서는 수계 일관성이 있는 많은 자료를 활용하여 모형에 필요한 계 계수를 산정해야 할 것으로 생각된다.

	홍 수 기	비 홍 수 기
R^2	0.912	0.930

VI. 結 論

본 연구는 다목적 저수지 유입지점의 상류에 위치해 있는 T/M국으로 부터의 수문자료를 활용하여 시변성과 임의성이 강한 홍수기 및 비홍수기에 저수지 유입량을 정확히 예측할수 있는 동적-추계학적 예측모형식을 개발한 것이다. 위와같은 통계분석 및 모형화 과정을 통해 홍수기 및 비홍수기를 위해 최종적으로 개발된 동적-추계학적모형인 저수지 유입량 예측모형식은 아래와 같고, 정확도를 위한 결정계수 R^2 는 1시간 간격의 자료를 사용한 홍수기에는 0.912로 나타났고, 1일 간격의 자료를 사용한 비홍수기에는 0.930로, 정도가 매우 높게 나타났다. 그러나, 좀더 정확한 예측과 수계 전반적인 예측시스템을 개발하기 위해서는 영춘지점 상류의 각 소구역별 유역유출과정과 하도유출과정 등이 모형화 되어야함과 동시에 검증할 수 있는 자료수를 풍부히 하여 일관성있는 모형계수를 추정하여야 할 것으로 판단되었다.

VI. 参 考 文 献

1. Shim, S. B. & J. S. Han(1986) "A dynamic - stochastic model for reservoir water level forecasting", 5th Congress Asian and Pacific Regional Division of the International Association for Hydraulic Research, Seoul, Korea, Vol. I.
2. Box, G. E. P. and G. M. Jenkins(1976) "Time Series Analysis Forecasting and Control", Revised Edition, Holden Day.
3. Anderson, O. D. (1976) "Time Series Analysis and Forecasting : The Box - Jenkins Approach", Betterworths.
4. Hipel, K. W. & A. I. A. McLeod, Lennox, W. C. (1977) "Advanced in Box - Jenkins Modeling - 1. Model Construction", W.R.R., 13(3):567-575.
5. Hipel, K. W. & A. I. A. McLeod, Lennox, W. C. (1977) "Advanced in Box - Jenkins Modeling - 2. Applications", W.R.R., 13(3):577-586.
6. 한국수자원공사(1990) 저수지 수문조작을 위한 홍수유입량의 예측모형개발, 연구보고서.
7. 심순보, 한재석(1986) "홍수기 대청 다목적댐의 저수위 예측모형", 충북대학교 건설기술연구소 논문집, Vol. (5):69-77.
8. Kitanidis, P. K. & R. L. Bras(1980) "Real-time Forecasting with a Conceptual Hydrologic Model. 2. Application and Results", W.R.R., 16(6):1034-1044.
9. Kitanidis, P. K. & R. L. Bras(1980) "Real-time Forecasting with a Conceptual Hydrologic Model. 1. Analysis of Uncertainty", W.R.R., 16(6):1025-1033.
10. IMSL Library, (1984) Reference Manual (Vol. 1-Vol. 4).