

저수지 최적운영모형을 위한 추계학적 모의 발생 모형의 유도

Stochastic Generation Model Development for Optimum
Reservoir Operation of Water Distribution System

김태균* · 윤용남** · 김중훈**

Kim, Tae Geun · Yoon, Yong Nam · Kim, Joong Hoon

Abstract

It is common practice in the case of optimum reservoir operation model that the reservoir inflow series are generated by stochastic model with keeping other variable such as water demands from the reservoir constant. However, when the input and output of the water distribution system have close relationship the output variables can be stochastically generated in relation with the input variables. In the present study the reservoir inflow series, the input of the system, is generated by periodic autoregressive model with constant parameter, and the agricultural water demand series, the output, is generated using periodic multivariate autoregressive model with constant parameter. The time period of the data series generated is taken as 10-day which is the common period used for agricultural water uses. The results of data generation by two different models showed that the periodic stochastic models well represent the characteristics of the historical time series, and that in the case of generating model for agricultural demand series it has closer relation with reservoir inflow than with the series itself.

요 지

일반적으로 다목적댐을 대상으로 하는 최적운영모형에 이용되는 각종 추계학적 모의 모형은 주로 저수지 유입량을 모의하기 위한 모형이며, 시스템으로부터의 용수수요량과 같은 변수들은 일정한 값을 가진다고 가정한다. 그러나 특수한 목적의 저수지의 경우 시스템 구성인자들 사이에 어떤 상관성이 있다면, 이를 이용하여 각 변수들의 관계를 도출한 후, 시스템을 구성하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 농업용수 공급을 목적으로 하는 다목적댐을 대상으로 강우 및 기상조건에 영향을 받는 순별 저수지 유입량과 농업용수 수요량을 각각 일정변수 주기성 자기회귀모형과 일정변수 주기성 다변량 자기회귀모형을 이용하여 모의발생 하였다. 유도된 모형은 각 변수의 통계학적 특성을 잘 나타내며, 농업용수 수요량의 경우 전(前) 시간의 수요량보다는 현재 운영기간(旬)의 저수지 유입량과의 상관관계에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

* 정희원 · 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정

* * 정희원 · 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

1. 서론

최근 많은 추계학적 모의모형이 최적화기법을 이용한 저수지 운영률의 도출을 위하여 이용되고 있다. 또한 어떤 최적화기법을 이용하든지 간에 최적화문제를 구성(formulation)할 경우, 주로 저수지 상태 방정식을 위한 유입량을 모의하기 위하여 이용되며, 다른 변수, 예를 들면 각종 용수수요량 등은 변하지 않는 일정한 값을 가지는 것으로 가정한다.⁽¹⁸⁾

그러나 일반적인 운영률 도출을 시도하는 다목적법이 아닌 특정 목적을 가진 저수지의 경우, 이러한 방법보다는 시스템의 어떤 변수간의 상관성 등을 고려하여 최적화문제를 구성하는 것이 바람직하다. 예를 들면 농업용 저수지를 위한 최적화 문제의 구성시 저수지 유입량뿐 아니라 농업용수 수요량도 모의하여 문제를 구성하는 것이다. 실제 저수지 유입량과 농업용수 수요량의 관계는 강우를 인자로서 역상관관계를 가진다. 즉 강우의 증가는 저수지 유입량의 증가를 야기시키며, 동시에 자연적인 농업용수 공급(강우) 및 증발산량의 감소로 인하여 농업용수 수요량은 감소한다.

따라서 본 연구에서는 농업용수의 공급을 주요 목적으로 하는 다목적법을 대상으로, 최적화문제 구성시 필요한 저수지 유입량 및 농업용수 수요량에 대한 추계학적 모의모형을 유도하고자 한다.

일반적으로 연유출량 모의를 위한 자기회귀모형은 Yevdjedich.⁽⁹⁾ Beard,⁽²⁾ Box-Jenkins⁽³⁾ 등에 의하여 충분히 연구되었으나, 주기성 자기회귀모형은 Quimpo(1967)이 일유출량 모의를 시도하였으며, 월 유출량의 경우 Tao-Delleur(1976),⁽¹¹⁾ Srikanthan-McMahan(1982),⁽¹⁰⁾ Salas *et al.*(1982),⁽⁸⁾ 전시영⁽¹⁶⁾ 등에 의하여 연구되었으며, 대부분의 모형이 주기성변수 주기성 자기회귀모형(Periodic Autoregressive Model with periodic parameter)을 이용하였다. 또 일정변수 주기성 자기회귀모형(Periodic Autoregressive Model with constant parameter)을 이용한 연구로서는 정성원(1987)⁽¹⁷⁾ 등이 있으나 그리 활발히 연구되지 않았다.

2. 추계학적 모의 모형

2.1 저수지 유입량 모의를 위한 주기성 자기회귀모형

앞에서 설명한 바와 같이 순별 저수지 유입량 모의 모형은 1년을 36개 순으로 구분한 주기성 자기회귀모형이 된다. 주기성 자기회귀모형은 다시 일정변수를 갖는 모형과 주기에 따라 모형의 변수가 변하는 모형의 2가지로 나눌 수 있으며, 이 두 모형은 주기성 상관도가 순별 변동성이 없는 경우는 전자의 모형을, 변동성이 큰 경우 후자의 모형을 이용하나, 이를 구분하기 위한 뚜렷한 기준은 없다.^(6,9,12)

본 연구에서는 일정변수를 갖는 주기성 자기회귀모형(periodic autoregressive model with constant parameter, 이하 PAR model)를 이용하고자 하며, 모의모형의 구성 및 변수의 추정과정은 주기성분을 제거하는 것 이외에는 연 유출량 모의를 위한 자기회귀모형(annual autoregressive model)과 동일하다.⁽⁹⁾

2.1.1 주기성 시계열의 주기성분 제거

주기성 시계열로부터 주기성분을 제거하기 위하여서는, 먼저 각 주기의 시계열이 어떤 분포형을 따르는 지를 판정한 후, 이들 각 주기의 시계열을 정규화(normalization)하여야 한다. 정규화하는 방법에는 대수변환(log transformation), 멱수변환(power transformation) 등이 있다.⁽²⁾

1년을 ω 개의 시간간격으로 나눈 주기성 시계열의 각 주기별 시계열이 각각의 분포형에 따라 정규화되었다면, 이를 표준화(standardization)하여 표준정규분포에 맞는 시계열을 작성하여야 한다.

$$z_{v,t} = \frac{y_{v,t} - \mu_{\tau}}{\sigma_{\tau}} \quad (1)$$

- 여기서 $z_{v,t}$: 표준화, 정규화된 자료
- $y_{v,t}$: 정규화된 자료
- μ_{τ} : 주기 τ 의 정규화된 자료의 평균
- σ_{τ} : 주기 τ 의 정규화된 자료의 표준편차
- v : 年
- τ : 1년 동안의 기간간격(1, 2, ..., ω)

정규화와 표준화를 거친 자료는 주기성분이 제거된 자료로서 주기성이 없는 시계열로 나타내면 아래와 같다.⁽⁹⁾

$$z_t = z_{v,t}, \quad t = (v-1)\omega + \tau \quad (2)$$

2.1.2 일정변수 자기회귀모형(PAR(p) Model)의

일반식

일정변수 주기성자기회귀모형은 연유출량모의를 위한 자기회귀모형과 동일하므로, 정규화, 표준화된 정상시계열(stationary time series)의 p차 자기회귀모형의 일반식은 다음과 같다.^(2,6,7)

$$z_t = \beta_1 z_{t-1} + \beta_2 z_{t-2} + \dots + 10b_p z_{t-p} + \varepsilon_t \quad (3)$$

式 (3)에서 무작위 변량 ε_t 를 평균이 "0"이고, 분산이 "1"인 표준정규난수(normal random number), ζ_t 로 나타내면 아래와 같다.^(4,9)

$$z_t = \beta_1 z_{t-1} + \beta_2 z_{t-2} + \dots + \beta_p z_{t-p} + \alpha_t \zeta_t \quad (4)$$

式 (4)로 나타나는 p차 자기회귀모형의 자기회귀계수 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 는 式 (5)와 같이 표시되는 Yule-Walker 방정식을 이용하여 구할 수 있으며, 무작위 변량 ε_t 의 분산(σ_ε^2)은 式 (2, 6)으로부터 구할 수 있다.⁽⁹⁾

$$\rho_j = \beta_1 \rho_{j-1} + \beta_2 \rho_{j-2} + \dots + \beta_p \rho_{j-p} \quad (5)$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = 1 - \sum_{j=1}^p \beta_j \rho_j \quad (6)$$

여기서 ρ_j 는 j차 계열상관계수(j-th serial correlation coefficient, $j=1, 2, \dots, p$)이다.

2.1.3 적합도 검정(goodness of fit test)

앞에서 설명한 자기회귀모형이 실제 관측된 자료의 특성을 잘 나타내는지를 판정하여야 하며, 이를 적합도 검정이라 한다. 적합도 검정은 선택한 모형과 과거 자료를 이용하여, 두 자료의 통계특성치를 직접 비교하는 방법과 잔차(residual)를 구한 후, 이 잔차 시계열의 독립성(independence), 정규성(normality) 및 모형 차수의 적정성을 판단하는 방법이 있다.^(1,9) 여기서 잔차 ε_t 는 관측된 자료와 선정된 모형을 이용하여 아래의 식으로 구한다.

$$\varepsilon_t = z'_t - (\beta_1 z'_{t-1} + \dots + \beta_p z'_{t-p}) \quad (7)$$

여기서 z'_t 는 관측된 자료의 정규화, 표준화된 시계열이다.

가) 통계특성치의 비교

관측자료와 式 (4)을 이용한 모의 발생 자료의 평균, 표준편차 및 상관도 등을 비교하여 추계학적 모의 모형이 관측자료를 잘 나타내는지를 판정한다.⁽⁵⁾

나) 독립성 검정(test of independence)

式 (7)로부터 구한 잔차 ε_t 는 자기회귀성분이 제거된 무작위계열(random series)이어야 하고, 이를 위한 검증방법에는 Porte Manteau lack of fit test와 The Cumulative Periodogram Test 등이 있다. 본 연구에서는 독립성 검증을 위하여 Porte Manteau lack of fit test를 이용하기로 하며, 이때 이용되는 통계치 Q_L 는

$$Q_L = N \sum_{k=1}^L \gamma_k^2(\varepsilon_t) \quad (8)$$

여기서 Q_L : (L-p)의 자유도를 가지는 Chi-square 분포를 따르는 통계치

N : 자료의 갯수

L : 최대 지체(Lag)수

$\gamma_k(\varepsilon_t)$: 무작위계열 ε_t 의 Lag-k 자기상관계수

와 같고, 무작위 계열(ε_t)가 독립이면, 통계치 Q_L 는

$$Q_L < \chi_{L-p, \alpha}^2$$

이어야 한다. 여기서 $\chi_{L-p, \alpha}^2$ 는 자유도 L-p, 유의수준에 해당하는 Chi-square값이며, 또 최대지체수(L)은 총 자료수(N)의 10%~30%로 하는 것이 적당하다.⁽⁹⁾

다) 정규성 검정(test of normality)

자기회귀모형의 유도는 시계열이 정규분포를 따른다는 가정하에 이루어지므로, 式 (7)로 계산되는 무작위계열, ε_t 도 정규분포를 따라야 한다. 정규성 검정은 무작위계열의 왜곡도 계수를 이용하는 방법과 분포형 검정을 통하여 정규분포를 따르는지 판단하는 방법이 있다.^(6,9)

왜곡도계수법(skewness test)은 무작위계열이 정규분포를 따른다면 왜곡도계수(C_s)가 "0"이어야 하나, 왜곡도계수(C_s)가 아래의 범위에 든다면 정규분포를 따르는 것으로 간주한다.

$$[-U_{1-\alpha/2} \sqrt{6/N}, U_{1-\alpha/2} \sqrt{6/N}] \quad (9)$$

여기서 $U_{1-\alpha/2}$ 는 표준정규분포의 비초과확률, $P(X \leq z) = 1 - \alpha/2$ 에 해당하는 변량 값(quantile of standard normal distribution)이다.

또 분포형검정을 통하여 정규성을 정하는 방법으로는 Kolmogorov-Smirnov Test 또는 Chi-Square Test를 이용하여 무작위계열이 정규분포를 따르는지

판정하는 방법이다.⁽⁹⁾

라) 적정 차수 검정(parsimony test)

선택한 모형의 차수가 적정한 지 여부는 General Index of Parsimony 방법과 Akaike Information Criterion(AIC)를 구하여 판단할 수 있다.^(4,9)

General Index of Parsimony 방법은 아래의 식으로 나타나는 General Index가 "15" 이상이면 모형의 차수가 적절한 것으로 판단할 수 있다.⁽⁹⁾

$$\delta = \frac{N}{p} \quad (10)$$

여기서 δ : general Index of parsimony parameter

N : 자료의 총 갯수

p : 모형의 차수

또 p차 자기회귀모형에 대한 Akaike Information Criterion, AIC(p)는

$$AIC(p) = N \times \ln(\sigma_s^2) + 2p \quad (11)$$

로 구할 수 있다. 만약 선택한 모형의 차수가 적절하다면

$$AIC(p-1) > AIC(p) < AIC(p+1) \quad (12)$$

이어야 한다.

2.2 다변량 자기회귀모형

다변량 자기회귀모형(multivariate autoregressive model, 이하 ARX model)은 하천 유량의 실시간 예측에 주로 이용되는 모형이며 기본식은 다음과 같다.^(2,6)

$$q_t = a_1 q_{t-1} + a_2 q_{t-2} + \dots + a_p q_{t-p} + b_0 p_t + b_1 p_{t-1} + \dots + b_r p_{t-r} + \eta_t \quad (13)$$

여기서 q_t : t 시간의 유출량

p_t : t 시간의 강우량

식 (13)으로 나타나는 ARX(p, r) 모형의 기본 가정은 일반적인 자기회귀모형과 동일하며, 본 연구에서는 ARX(p, r) 모형중 가장 널리 이용되는 ARX(1, 0) 모형을 이용하여 농업용수 수요량을 모의하고자 한다. 저수지 유입량과 농업용수 수요량의 교차상관성을 이용하여 수요량을 구하고자 하므로,

ARX(1, 0) 모형은 주기성 다변량 자기회귀모형이어야 하며, 저수지 유입량을 위한 모의모형이 일정변수를 가지는 주기성 모형이므로, ARX(1, 0) 모형도 일정변수 주기성 다변량 자기회귀모형으로 하고자 한다. 따라서 2.1절에서 언급한 일정변수 주기성 자기회귀모형과 같이 주기성을 제거하여 정규화 한 후, 표준화한 자료를 이용하여야 하며, ARX(1, 0) 모형의 기본식은 다음과 같다.

$$D_t = a_1 D_{t-1} + b_0 z_t + a_1 \theta \eta_t \quad (14a)$$

$$= a_1 D_{t-1} + b_0 z_t + \sigma_\eta \zeta_t \quad (14b)$$

여기서 D_t : t 기간의 농업용수 수요감소량

z_t : t 시간의 저수지 유입량

η_t : 부작위 성분

ζ_t : standard normal random number

2.2.1 변수의 추정

ARX(1,0) 모형의 변수(parameter)는 AR(p) 모형과 같은 방법으로 구할 수 있다. 먼저 모형을 구성하는 자료가 N(1, 0)의 특성을 가지므로 식 (14a)의 양변에 D_{t-1} 를 곱한 후, 기대값을 취하면

$$v_1 = a_1 + b_0 \pi_1 \quad (15)$$

여기서 v_1 : D_t 의 1차 계열 상관계수

π_1 : z_t 와 D_t 의 1차 교차 상관계수

이 되며, π_1 를 식 (14a)에 곱하여 기대값을 취하면

$$\pi_0 = a_1 \pi_1 + b_0 \quad (16)$$

을 구할 수 있다. 식 (15)와 식 (16)을 정리하여 a_1 과 b_0 에 대하여 풀이하면

$$a_1 = \frac{v_1 - \pi_1 \pi_0}{1 - \pi_1^2} \quad (17)$$

$$b_0 = \frac{v_0 - \pi_1 \pi_1}{1 - \pi_1^2} \quad (18)$$

또한 무작위 시계열의 분산은 식 (14a)의 양변을 제곱하면 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_\eta = \sqrt{1 - a_1 v_1 - b_0 \pi_0} \quad (19)$$

2.2.2 적합도 검정

ARX(1, 0) 모형의 적합도 검정은 연유출량 모의를

위한 자기회귀모형과는 달리 잘 알려져 있지 않다. 따라서 다변량 자기회귀모형의 적합도 검정은 실측자료와 모의발생자료의 통계특성치를 비교하여 모의발생자료가 실측자료의 통계학적 특성치를 잘 나타내는지 판정하고자 한다. 이때 이용되는 통계특성치는 각 주기별 평균, 표준편차, 왜곡도계수 및 자기상관도 등이다.^(4,13)

3. 대상지역

저수지 유입량 및 농업용수 수요량 모의를 위한 추계학적 모형을 적용하기 위한 대상지역으로는 섬진강 다목적댐과 동진농지개량조합이 위치한 동진강 유역을 선택하였다.

섬진강댐은 총 저류량이 $466 \times 10^6 \text{ m}^3$ (홍수위 197.7 m)이고, 홍수조절, 발전, 용수공급 등을 목적으로 하며, 유역변경을 통하여 우리나라 최대의 농업지역인 동진강 일대에 농업용수를 공급하고 있고, 수자원 기득권에 있어서도 저수위 175 m(저류량 46.6

$\times 10^6 \text{ m}^3$) 이하의 수자원은 동진농지개량조합이 관할한다. 따라서 섬진강댐의 경우, 다른 다목적댐과는 달리 농업용수 공급 및 이로 인한 발전이 최대 목적이 될 수 있다.

4. 추계학적 모의 모형의 유도

저수지 유입량 모의를 위한 자료로는 1975년~1991년까지의 일유입량 자료를 이용하여 순별 일평균 유입량을 획득하여 이용하였으며, 농업용수 수요량의 경우는 FAO에서 권장하는 수정 Penman 방법을 이용하여 증발산량을 구한 후, 유효우량개념을 이용하여 수요량을 산정하였고,⁽¹⁴⁾ 증발산량 산정을 위하여 전주기상청의 기상자료를 이용하였다.

4.1 저수지 유입량 모의를 위한 일정변수 주기성 자기회귀모형

4.1.1 모형의 유도

표 4.1. 적정분포형 검정

| 주기 | 저수지 유입량 | | | 농업용수수요감소량 | | | 주기 | 저수지 유입량 | | | 농업용수수요감소량 | | |
|----|---------|-------|-------|-----------|-------|-------|----|---------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | 정규 | 대수 정규 | GAMMA | 정규 | 대수 정규 | GAMMA | | 정규 | 대수 정규 | GAMMA | 정규 | 대수 정규 | GAMMA |
| 1 | O | O | O | O | O | O | 19 | X | O | X | O | O | O |
| 2 | O | O | O | O | O | O | 20 | O | O | X | O | O | O |
| 3 | O | O | X | O | O | O | 21 | O | O | X | O | O | O |
| 4 | O | O | X | O | O | O | 22 | O | O | X | O | O | O |
| 5 | O | O | X | O | O | O | 23 | O | O | X | O | O | O |
| 6 | O | O | X | O | O | O | 24 | O | O | X | O | O | O |
| 7 | O | O | X | O | O | O | 25 | O | O | X | O | O | O |
| 8 | O | O | X | O | O | O | 26 | O | O | X | O | O | O |
| 9 | O | O | X | O | O | O | 27 | O | O | X | O | O | O |
| 10 | O | O | X | O | O | O | 28 | O | O | X | O | O | O |
| 11 | O | O | X | O | O | O | 29 | O | O | X | O | O | O |
| 12 | O | O | X | O | O | O | 30 | O | O | X | O | O | O |
| 13 | O | O | X | O | O | O | 31 | O | O | X | O | O | O |
| 14 | O | O | X | O | O | O | 32 | O | O | X | O | O | O |
| 15 | O | O | X | O | O | O | 33 | O | O | X | O | O | O |
| 16 | O | O | X | O | O | O | 34 | O | O | X | O | O | O |
| 17 | O | O | X | O | O | O | 35 | O | O | X | O | O | O |
| 18 | O | O | X | O | O | O | 36 | O | O | X | O | O | O |

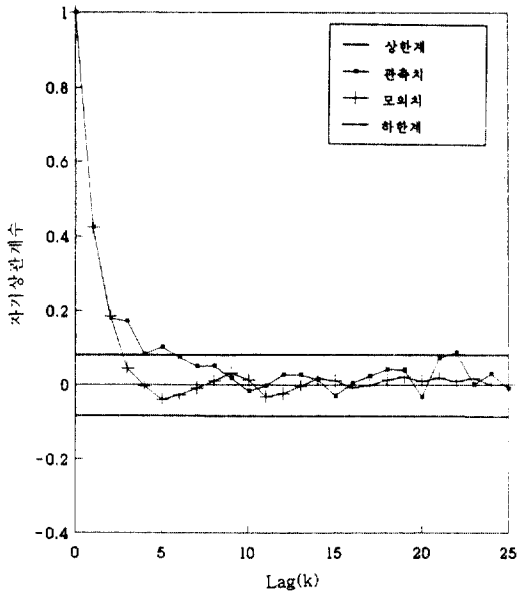


그림 4.1. 저수지 유입량의 자기상관도

순별 일 평균유입량 자료를 이용하여 모의모형을 유도하기 위하여 앞에서 설명한 바와 같이 각 주기별로 적정 분포형을 검정하여 각 주기별로 표준화, 정규화한다. 먼저 표준화를 위하여 정규분포, 대수 정규분포, 2-parameter Gamma 분포에 Kolmogorov-Smirnov Test를 이용하여 유의수준 5%에 대한 분포형을 검정한 결과 표 4.1과 같이 모든 주기가 대수정규분포를 따르는 것으로 나타났으며, 이에 따라 식 (20)의 대수변환(log-transformation)을 이용하여 표준화한 후, 식 (1)에 따라 정규화하였다.

$$y_{v,t} = \ln(x_{v,t}) \quad (20)$$

다음으로 수문학적 지속성 여부를 판정하기 위하여 Exact Test를 실시하였으며,⁽¹⁴⁾ 저수지 유입량의 자기회귀상관도가 그림 4.1에 나타나 있다. 그림 4.1을 살펴보면 1차 자기상관계수가 식 (21)로 나타나는 상·하한계를 벗어나므로 저수지 유입량 자료는 수문학적 지속성이 있는 것으로 판단되며, 따라서 자기회귀모형을 이용할 수 있다.

$$\left[-\frac{1}{(n-1)} - 1.96 \frac{(n-2)}{(n-1)^{3/2}}, -\frac{1}{(n-1)} + 1.96 \frac{(n-2)}{(n-1)^{3/2}} \right] \quad (21)$$

또 모형의 차수결정을 위하여 부분자기상관계수를

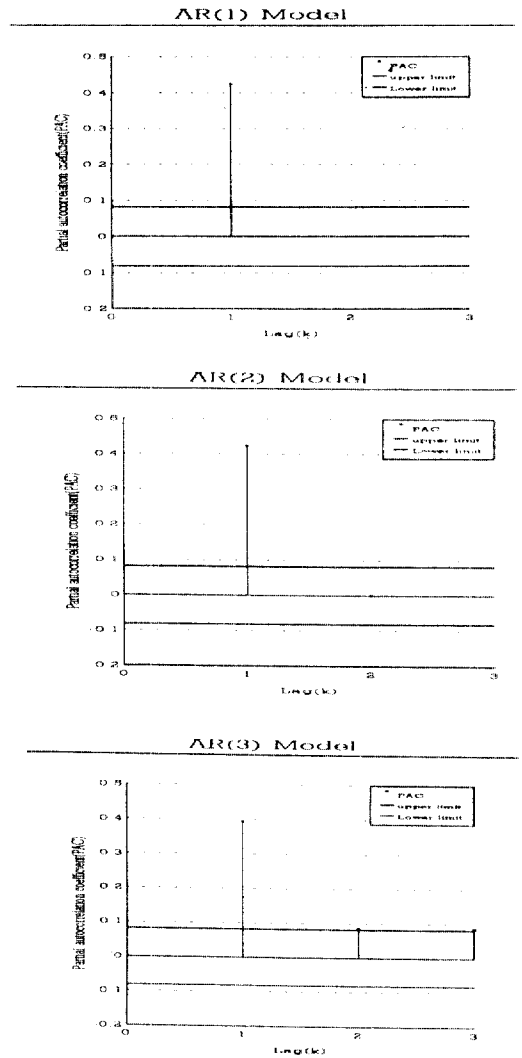


그림 4.2. 저수지 유입량의 부분자기상관도

구하였으며,⁽⁹⁾ AR(1), AR(2), AR(3) 모형에 대하여 부분자기상관계수를 구한 결과 그림 4.2에서 알 수 있는 바와 같이 AR(1) 모형이 가장 적절한 것으로 판정되었다. 따라서 저수지유입량 모의를 위한 일 정변수 주기성 자기회귀모형은 PAR(1) 모형으로 결정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

$$\beta_1 = \gamma_1 = 0.424$$

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{1 - \beta_1 \gamma_1} = \sqrt{1 - 0.424^2} = 0.906$$

$$z_t = 0.424z_{t-1} + 0.906\varepsilon_t \quad (22)$$

4.1.2 적합도 검정

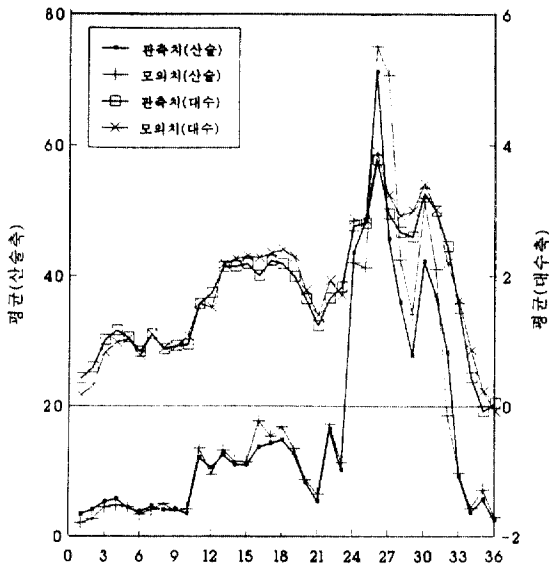


그림 4.2. 저수지 유입량 평균

앞 절에서 유도한 일정변수 주기성 자기회귀모형이 과거 기록치의 특성을 나타내기 적합한 지 또는 차수의 결정 및 추계학적 모의모형에 대한 기본가정에 잘 맞는 지 여부는 2장에서 언급한 적합도검정을 이용하여 파악할 수 있다. 먼저 식 (22)에 따라 50년간의 순별 저수지 유입량을 모의한 후, 통계학적 특성치인 평균, 표준편차를 이용하여 과거 기록치와 모의발생치를 비교하였으며, 그 결과가

그림 4.2, 4.3에 나타나 있다. 또한 적정차수의 선정 및 기본가정에 대한 각종 test 결과가 표 4.2에 나타나 있으며, 선정된 모형이 과거 기록치를 나타내는데 큰 어려움이 없는 것으로 나타났다.

4.2 농업용수 수요량 모의를 위한 일정변수 주기성 다변량 자기회귀모형

앞에서 설명한 바와 같이 저수지 유입량과 농업용수 수요량은 강우를 인자로 상호 역상관계에 있으나, 논에 허용담수심(보통 60 mm) 이상의 강우에 대하여, 저수지 유입량은 강우의 증가에 따라 증가하나, 농업용수 수요량은 허용담수심 이상의 강우는 논에 저류되지 않고 하천으로 유하하므로 농업용수 감소에 기여하지 못한다. 즉 허용담수심만큼의 강우와 같은 감소량을 나타낸다. 따라서 이들 두변수의 직접적인 관계를 도출하지 못하고 추계학적 모의모형을 이용하여 농업용수 수요량을 모의하고자 하며, 이들 두 변수는 역상관계에 있으므로, 저수지 유입량과 농업용수 수요감소량의 관계를 이용하여 모형을 유도하는 것이 편리하다.

4.2.1 농업용수 수요감소량 계열의 작성

앞에서 설명한 바와 같이 저수지 유입량과 농업용수 수요량은 역상관계에 있으므로, 저수지 유입량 증가에 따른 농업용수 수요량이 얼마나 감소하는 지를 알면 저수지 유입량과 농업용수 수요량의

표 4.2. PAR(1) 적합도 검정

| 구 분 | 잔차시계열(Residual Series) |
|---------|------------------------|
| 평균 | 0.0004 |
| 분산 | 0.8793 |
| 왜곡도계수 | 0.0348 |
| 1차 상관계수 | 0.0732 |
| 2차 상관계수 | 0.0002 |

적합도검정

| | | |
|--|--|--------|
| GENERAL INDEX OF PARSIMONY | 15 < 612 | ACCEPT |
| PORTE MANTEAU LACK OF FIT | L = 61; Q(80.41) < X ² (88.4) | ACCEPT |
| NORMALITY TEST BY SKEWNESS (유의수준, α = 5%) | -0.19407 < -0.03788 < 0.19407 | ACCEPT |
| AKAIKE TEST OF PARSIMONY (유의수준, α = 5%) | AIC(1) = -140.921 AIC(2) = -137.206 | ACCEPT |

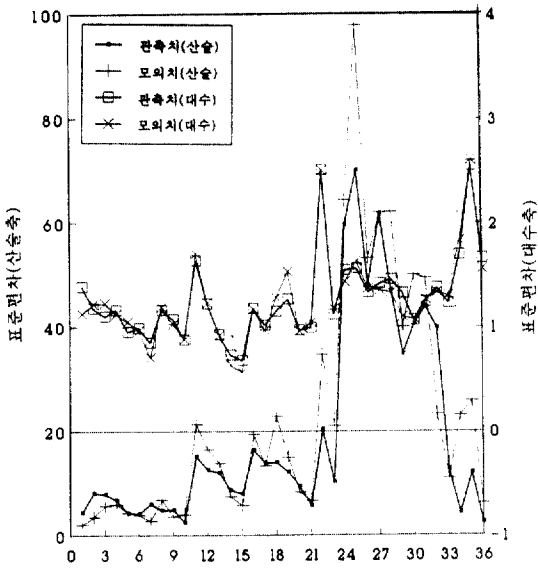


그림 4.3. 저수지 유입량 표준편차

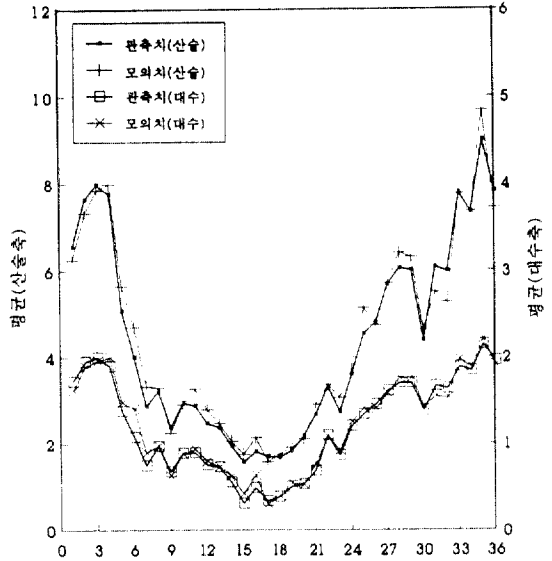


그림 4.4. 농업용수 수요감소량의 평균

관계를 직접 도출하지 않아도 쉽게 역상관관계를 구할 수 있다. 농업용수 수요감소량은 어떤 기준 수요량에 대한 해당 순의 수요량을 감하여 구할 수 있으나, 농업용수 수요량에 대한 절대적인 기준을 설정하기 어렵다. 따라서 1945년부터 1991년까지의 기상자료를 이용하여 일별 농업용수 수요량을 구하고, 각 일별로 365개의 최대 농업용수 수요량을 찾은 후, 이로부터 순별 평균 최대수요량을 구하여 농업용수 수요감소량을 구하였다. 농업용수 수요감소량 계열은 순별 평균 최대수요량에서 분석기간 동안의 농업용수 수요량을 감하여 작성하였다.

$$\text{수요감소량} = \text{순별 평균 최대수요량} - \text{순별 수요량} \quad (23)$$

여기서 순별 평균 최대수요량은 1941~1991년 사이의 최대 일수요량으로부터 구한 순별 평균수요량이며, 순별 수요량은 분석대상 기간(1975년~1991년)의 순별 수요량이다.

4.2.2 농업용수 수요감소량 모의를 위한 추계학적 모의 모형의 유도

농업용수 수요감소량 모의를 위한 추계학적 모형을 유도하기 위하여, 저수지 유입량과 같이 각 순별 평균, 표준편차를 구하였으며, 그림 4.4 및 그림 4.5에 나타나 있다. 다음으로 이들 각 주기의 주기성분을 제거하기 위하여 저수지 유입량에서와 같이 3가지

분포형에 대하여 분포형 검정을 실시하였으며, 표 4.1의 결과를 살펴보면 농업용수 수요감소량계열은 3개 분포형에 모두 적합한 것으로 나타났다. 저수지 유입량이 대수정규분포를 따르므로, 농업용수 수요감소량계열도 대수정규분포를 따르는 것으로 하여, 식 (20)을 이용하여 대수변환을 실시하였고, 식 (1)을 이용하여 표준화하여 식 (2)를 이용하여 주기성분이 제거된 하나의 시계열을 작성하였다.

다음으로 일정변수 주기성 다변량 자기회귀모형(이하 PARX(1, 0) 모형)의 계수를 결정하기 위하여, 감소량계열의 자기상관계수 및 저수지 유입량 자료와의 교차상관계수를 구하여 그림 4.4 및 4.5에 표시하였다. 그림 4.5를 살펴보면 교차상관계수는 상당한 상관성을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 식 (17), (18), (2, 19)을 이용하여 ARX(1, 0) 모형의 계수를 구하여, 농업용수 수요감소량 계열의 모의를 위한 추계학적 모형을 유도하면 아래와 같다.

$$a_1 = \frac{v_1 - \pi_0 \pi_1}{1 - \pi_1^2} = \frac{0.218 - 0.640 \times 0.381}{1 - 0.361^2} = -0.030$$

$$b_0 = \frac{\pi_0 - v_1 \pi_1}{1 - \pi_1^2} = \frac{0.640 - 0.218 \times 0.381}{1 - 0.361^2} = 0.652$$

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{1 - a_1 v_1 - b_0 \pi_0} = \sqrt{1 - (-0.030) \times 0.652 \times 0.640} = 0.768$$

$$D_t = -0.030Q_{t-1} + 0.652z_t + 0.768\varepsilon_t \quad (24)$$

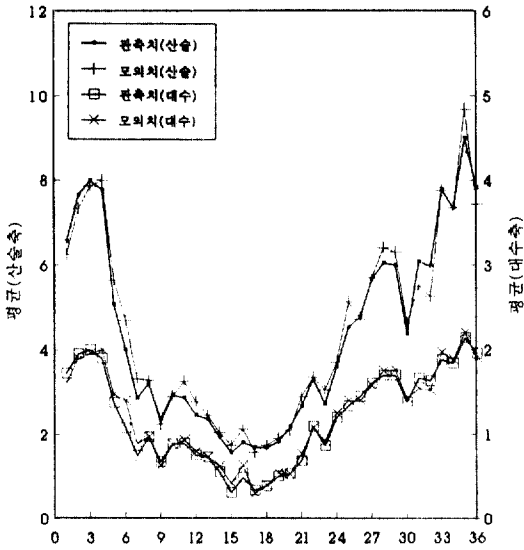


그림 4.5. 농업용수 수요감소량의 표준편차

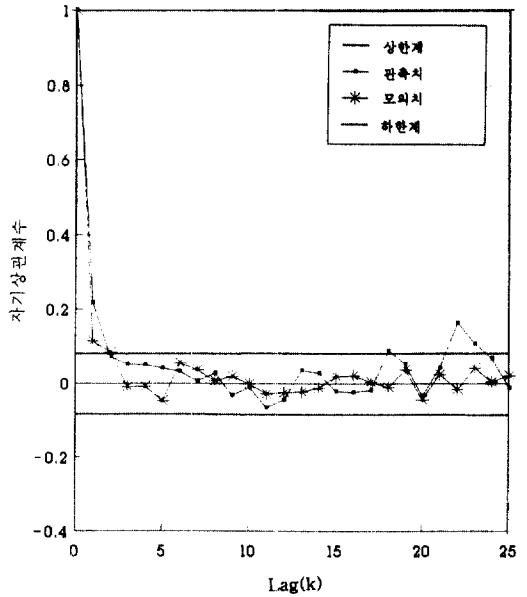


그림 4.6. 농업용수 수요감소량의 자기상관도

식 (24)를 살펴보면, 농업용수 수요감소량은 전순의 농업용수 수요감소량보다는 저수지 유입량에 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

4.2.3 일정변수 주기성 다변량 자기회귀모형의 적합도 검정

2.2.2절에서 설명한 바와 같이 ARX(1, 0) 모형의 적합도 검정은 잘 알려져 있지 않으므로, 과거 기록치의 통계학적 특성을 얼마나 잘 나타내는 지를 저수지 유입량의 경우와 같이 50년간의 자료를 발생하여 평균, 표준편차에 대하여 살펴보았으며, 그림 4.6 및 4.7에 나타내었다. 이들 그림의 결과를 비교하면 일정변수 주기성 다변량 자기회귀모형으로 모의한 농업용수 수요감소량은 과거의 기록치의 특성을 잘 나타냄을 알 수 있다.

4.2.4 농업용수 수요량의 산정

4.2.3절의 일정변수 주기성 다변량 자기회귀모형으로 모의한 농업용수 수요감소량을 농업용수 수요량으로 변환하기 위하여서는 먼저 저수지 유입량과 함께 농업용수 수요감소량을 발생한 후, 역정규화, 역표준화를 실시한 후, 이를 식 (2)에 따라 하나의 시계열로 된 자료를 주기성 시계열로 변환한 후, 4.2.1절에서 구한 순별 평균 최대수용량에서 감하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{모의 수요량} &= \text{순별 평균 최대수용량} \\ &\quad - \text{순별 모의 수요감소량} \end{aligned} \quad (25)$$

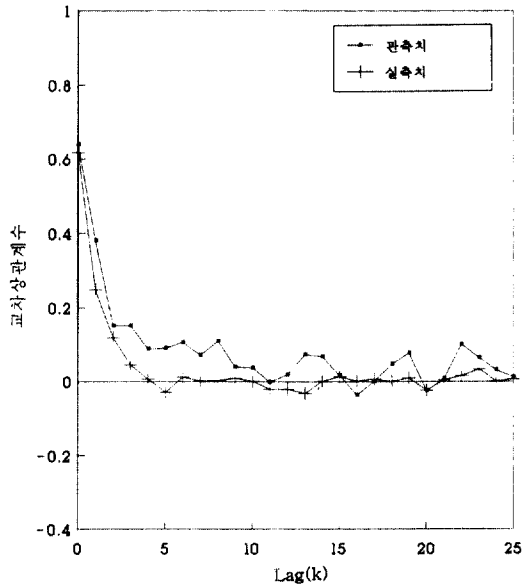


그림 4.7. 농업용수 수요감소량-저수지 유입량의 교차상관도

5. 결 론

저수지 최적운명을 목적으로 하는 최적화 문제에 있어서 추계학적 모의 모형은 주로 저수지 유입량을 모의하기 위하여 이용되며, 시스템의 다른 변수들은

일정하거나 또는 월별로 변하는 기지의 값을 이용한다. 그러나 특수 목적의 저수지 운영에 있어서, 시스템을 구성하는 변수들 간의 관계를 이용하여 각 변수를 위한 추계학적 모의 모형을 유도하여 시스템을 구성하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 농업용수 공급을 주요 목적으로 하는 저수지를 대상으로, 강우 및 기상인자에 의하여 영향을 받는 저수지 유입량 및 농업용수 수요량을 위하여 두 변수의 상관관계를 이용한 추계학적 모의 모형을 구성하였으며, 결론은 다음과 같다.

1) 순별 저수지 운영을 위한 저수지유입량을 일정변수 주기성 자기회귀모형, PAR(1) model로 나타내었으며, 유입량은 순별 강우의 크기에 따라 큰 영향을 받으므로 대단히 큰 분산을 나타낸다.

2) 순별 농업용수 수요량을 저수지 유입량과의 상관관계를 이용하여 일정변수 주기성 다변량 자기회귀모형, ARX(1, 0) model로 나타낼 수 있었으며,

3) 이들 두 모형을 이용하여 특수목적의 저수지 운영이나, 단기간의 운영을 위한 시스템을 구성할 경우, 수요량을 일정하다고 가정하는 것보다 최적 운영모형의 신뢰도를 제고할 수 있을 것이다.

본 연구의 결과로 얻은 추계학적 모형은 특정 목적의 저수지운영조작에 도움을 줄 수 있으며, 실시간 최적운영모형을 구성할 경우, 단기(short-term, 週, 日單位)운영방안 도출을 위한 저수지 유입량 및 농업용수 수요량예측모형에 이용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Ang, A.H.-S., and Tang, W.H., *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, John Wiley and Sons, 1975.
2. Beard, L.R., "Use of interrelated Records to Simulate Streamflows", *J. Hydraulic Div.*, ASCE, Vol. 91, No. HY5, 1965.
3. Box, G.E.P., and Jenkins, G., *Time Series Analysis, Forecasting and Control*, Holden-Day, 1970.
4. Bras, R.L., and Rodriguez-Iturbe, I., *Random Functions and Hydrology*, Addison-Wesley Publishing Company, 1985.
5. Haan, C.T., *Statistical Methods in Hydrology*, Iowa State University Press, 1977.
6. Kottegoda, N.T., *Stochastic Water Resources Technology*, The Macmillan Press LTD, 1980.
7. Kuo, J.-T., Hsu, N.-S., Chu, W.-S., Wan, S., and Lin Y.-J., "Real-Time Operation of Tanshui River Reservoirs", *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 116, No. 3, 1990, pp. 349-362.
8. Salas, J.D., Boes, D.C., and Smith, R.A., "Estimation of ARMA Models with Seasonal Parameter", *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, 1982.
9. Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V., and Lane, W.L., *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*, Water Resources Publications, 1980.
10. Srikanthan, R., and McMahan, T., "Stochastic Generation of Monthly Streamflows", *J. Hydraulic Div.*, ASCE, Vol. 108, No. HY3, 1982.
11. Tao, P.C., and Delleur, J.W., "Seasonal and Non-Seasonal ARMA Models in Hydrology", *J. Hydraulic Div.*, ASCE, Vol. 102, No. HY10, 1976.
12. Taylor, H.M., Karlin, S., *An Introduction to Stochastic Modeling*, Academic Press Inc., 1984.
13. Wong E., and Hajek, B., *Stochastic Processes in Engineering System*, Springer-Verlag New York Inc., 1985.
14. 농업진흥공사, 소비수량 산정방법 실용화 연구, 1989. 12.
15. 윤용남, 공업수문학, 청문각, 1992.
16. 윤용남, 전시영, ARMA(1, 1) 다계절모형에 의한 하천유량의 모의발생, 한국토목학회 논문집, 제 18 권, 1호, pp. 75-83, 1995.
17. 정성원, 자기회귀모형에 의한 일유량의 추계학적 모의발생, 석사학위논문, 고려대학교, 1987.
18. 한국수자원공사, 수자원연구소, 주압댐을 중심으로 한 섬진강수계내 저수지준의 연계최적운영(이수관리부문), 1992. 3.

(接受 : 1994. 3. 11)